

**ANÁLISIS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL
APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS GENERADO A PARTIR
DE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE RESIDUOS DE
CAFÉ EN UNA MICROTURBINA A GAS**

Felipe Marín Mejía

Cristian David Villa 0052amírez

Trabajo de Grado

Presentado como requisito para obtener el título de

Ingeniero Mecánico

Orientador

David Andrés Serrato Tobón, M.Sc.

Universidad Tecnológica de Pereira

Facultad de Ingeniería Mecánica

2020

Nota de aceptación

Pereira, junio de 2020

Orientador
David Andrés Serrato Tobón, M.Sc.
Universidad Tecnológica de Pereira

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo investigativo lo dedicamos principalmente a nuestros padres, por su amor, paciencia, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes hemos logrado llegar hasta aquí y convertirnos en lo que somos.

A nuestras familias por haber sido nuestro apoyo a lo largo de toda la carrera universitaria y a lo largo de la vida. A todas las personas especiales que nos acompañaron en esta etapa, aportando a nuestra formación tanto profesional y como seres humanos.

Agradecemos a nuestros docentes de la facultad de Ingeniería Mecánica y a la Universidad Tecnológica de Pereira, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestra profesión, de manera especial, a David Andrés Serrato Tobón, tutor de nuestro proyecto de investigación quien nos ha guiado con su paciencia, conocimiento y rectitud como docente.

RESUMEN

En este trabajo fue considerado el estudio de un sistema de generación de potencia basado en una microturbina a gas con recuperación de calor acoplada a un biodigestor donde son procesados residuos del café, dadas las ventajas que presentan estos sistemas integrados a pequeña escala de ser usados en zonas no interconectadas a una red de suministro de energía eléctrica donde se tiene disponibilidad local de una fuente de energía considerada generalmente como un desecho. El sistema es alimentado con biomasa residual agrícola, una fuente renovable de energía de CO₂ neutro, a partir de la cual mediante un biodigestor esta puede ser transformada durante un proceso de conversión bioquímica en un gas combustible conocido como biogás, cuya composición es mayoritariamente CH₄ y CO₂. Mediante un proceso de conversión termoquímica en la cámara de combustión de la microturbina a gas, la energía química contenida en esta mezcla combustible en fase gaseosa permite la generación de potencia mecánica, energía eléctrica y eventualmente calor para proceso. Fue considerada como región de estudio el Triángulo del Café, compuesto por los departamentos de Caldas, Quindío y Risaralda. Fue estimando el potencial productivo y energético bruto de los residuos de pulpa y mucilago de café producto del proceso de beneficio. Fue propuesto un modelo termodinámico con el fin de estimar el potencial de producción de biogás y el potencial energético teórico de la biomasa residual utilizada como fuente de energía en esta tecnología, y así, establecer la posibilidad de implementar este tipo de sistemas en regiones como son las zonas no interconectadas o pequeñas locaciones como fincas cafeteras donde el aprovechamiento de dicho recurso energético promueva soluciones de autoabastecimiento de energía. Fue estimado que el sistema es capaz de generar 22,2 kW/(100 kg/h), cuando es utilizado la pulpa de café y de 5,18 kW/(100 kg/h), cuando es utilizado el mucilago de café.

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Cadena de producción del biogás.....	7
Figura 2. Diagrama de Pareto para la producción nacional de café.	12
Figura 3. Esquema gráfico del proceso del café.....	13
Figura 4. Partes del café con su respectivo residuo.....	16
Figura 5. Esquema simplificado de las etapas de biodigestión anaerobia.....	21
Figura 6. Rango de temperaturas de la biodigestión anaerobia.....	22
Figura 7. Microturbina FlexTurbine MT250.....	26
Figura 8. Diagrama de flujo del marco metodológico.....	28
Figura 9. Porcentaje que representa cada uno de los residuos.....	29
Figura 10. Diagrama del ciclo de la microturbina a gas con regeneración.	31
Figura 11. Promedio de producción de café entre los años 2007 a 2018.	38
Figura 12. Usos de los residuos generados por el beneficiado de café en el Triángulo del Café.	39
Figura 13. Producción de biogás en los diferentes departamentos del Triángulo del Café..	41
Figura 14. Porcentaje de las especies en el biogás producido a partir de la pulpa.	41
Figura 15. Porcentaje de las especies en el biogás producido a partir del mucilago.....	42
Figura 16. Potencial energético de la pulpa y el mucilago en el Triángulo del Café.	43
Figura 17. Eficiencia de los sistemas.	44
Figura 18. Potencia del sistema en función del flujo de biomasa residual procesada.	45
Figura 19. Potencia en los diferentes componentes del sistema de generación.	46

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Cantidad anual de la biomasa residual agrícola.	8
Tabla 2. Producción de café a nivel mundial.....	10
Tabla 3. Producción de café a nivel nacional.	11
Tabla 4. Producción de café a nivel nacional en el año 2018.....	12
Tabla 5. Residuos obtenidos en el proceso de beneficio e industrialización de 1kg de café cereza.	17
Tabla 6. Rango de los gases que componen el biogás para diferentes biomasas.	24
Tabla 7. Propiedades de los gases que componen el biogás.....	24
Tabla 8. Caracterización fisicoquímica de la pulpa de café.	32
Tabla 9. Caracterización fisicoquímica del mucilago de café.	32
Tabla 10. Producción de café promedio entre 2007 al 2018 en el Triángulo del Café.	37
Tabla 11. Uso de los residuos en el Triángulo del Café.	38
Tabla 12. Generación específica de biogás.	39
Tabla 13. Potencial de generación de biogás en los departamentos que conforman el Triángulo del Café.	40
Tabla 14. Poder calorífico de los biogases generados.	42
Tabla 15. Parámetros de operación.....	43
Tabla 16. Parámetros de operación para las 9 microturbinas propuestas.	44
Tabla 17. Potencia en los diferentes componentes del sistema de generación.....	45
Tabla 18. Potencia y eficiencia del sistema en función de la humedad.....	46
Tabla 19. Potencia y eficiencia del sistema en función del aire de exceso.	47
Tabla 20. Variación de características químicas, tiempo de retención y producción de biogás para diversas materias primas.....	56
Tabla 21. Propiedades de los estados en el sistema alimentado por pulpa.....	57
Tabla 22. Fracciones molares del fluido de trabajo en los diferentes estados del sistema alimentado por pulpa.	57
Tabla 23. Propiedades de los estados en el sistema alimentado por mucilago.....	57
Tabla 24. Fracciones molares del fluido de trabajo en los diferentes estados del sistema alimentado por mucilago.	58
Tabla 25. Emisiones del sistema.	58

LISTA DE SÍMBOLOS

C_P	Calor específico a presión constante [kJ/kmol*K]
R_U	Constante ideal de los gases [kJ/kmol*K]
BOD	Demanda biológica de oxígeno [g/kg]
COD	Demanda química de oxígeno [g/kg]
H	Entalpía [kJ]
\bar{h}	Entalpía molar [kJ/kmol]
ϵ_R	Eficacia del recuperador
\dot{m}	Flujo másico [kg/s]
\dot{N}	Flujo molar [mol/s]
y	Fracción molar
MW	Masa molar [kg/mol]
ODM	Materia orgánica seca [g/kg]
N(Kjeldahl)	Nitrógeno total por el método de Kjeldahl [g/kg]
PCI	Poder calorífico inferior [kJ/kg]
\dot{W}	Potencia [kW]
BMP	Potencial bioquímico del metano [L/kg]
pH	Potencial de hidrógeno
r_C	Relación de compresión
R_{NH_3}	Residuos de amoníaco [kmol]
VS	Sólidos volátiles
T	Temperatura [K]
V_{Bio}	Volumen específico de biogás [L/kg]
V_{Total}	Volumen biogás [m ³ /año]
\dot{V}_{Total}	Flujo de biogás por segundo [m ³ /s]
$P_{RD\alpha}$	Potencial de residuo departamental anual [kg]
Saño	Cantidad de segundos en un año natural [s]

Símbolos griegos

ω	Contenido de humedad en el aire
η	Eficiencia

Subíndices

aw	Aire húmedo
c	Compresor
i	Entrada
F	Filtro
gc	Gases de escape
Org	Orgánico
j	Salida
T	Turbina
RDa	Residuo departamental anual

ÍNDICE

1	CAPÍTULO I.....	1
1.1	Introducción	1
1.2	Planteamiento del problema.....	2
1.3	Objetivos	3
1.3.1	Objetivo general:	3
1.3.2	Objetivos específicos:.....	3
1.4	Contribución	3
1.5	Estructura del documento	4
2	CAPÍTULO II.....	5
2.1	Antecedentes	5
2.2	Biomasa	6
2.2.1	Clasificación de la biomasa:	8
2.2.2	Caracterización fisicoquímica de la biomasa:	9
2.3	Café.....	10
2.3.1	Café en el mundo.....	10
2.3.2	Café en Colombia	10
2.3.3	Café en el Triángulo del Café.....	12
2.4	Proceso del café	12
2.4.1	Recolección de café	14
2.4.2	Beneficio de café	14
2.4.2.1	Beneficio Húmedo	14
2.4.2.2	Beneficio Seco	14
2.4.3	Torrefacción.....	14
2.5	Residuos generados por la industria cafetera.....	15
2.5.1	Disposiciones para la pulpa de café.....	17
2.6	Biodigestión	18
2.6.1	Biodigestión aerobia	19
2.6.2	Biodigestión anaerobia	19
2.7	Etapas de la fermentación metanogénica.....	20
2.7.1.1	Hidrólisis.....	20

2.7.1.2	Etapa fermentativa o acidogénica	20
2.7.1.3	Etapa acetogénica	20
2.7.1.4	Etapa metanogénica	21
2.8	Factores determinantes en el proceso metanogénico	21
2.8.1	Temperatura.....	21
2.8.2	Velocidad de carga volumétrica	22
2.8.3	Tiempo de retención hidráulica	23
2.9	Productos de la biodigestión anaerobia.....	23
2.9.1	Bio abono.....	23
2.9.2	Biogás	23
2.9.2.1	Propiedades del biogás.....	24
2.10	Tecnologías de aprovechamiento energético del biogás	25
2.10.1	Microturbina a gas con recuperación.....	25
3	CAPÍTULO III	28
3.1	Potencial productivo	28
3.1.1	Selección del cultivo.....	28
3.2	Selección de residuos susceptibles a ser transformados en procesos de conversión por biodigestión anaeróbica.....	29
3.3	Potencial productivo departamental teórico y técnico de la pulpa residual de café	29
3.4	Modelo termodinámico del sistema de generación de potencia	30
3.5	Caracterización fisicoquímica de la biomasa residual agrícola	31
3.5.1	Caracterización fisicoquímica de la pulpa de café	31
3.5.2	Caracterización fisicoquímica del mucilago de café	32
3.6	Modelo matemático de biodigestión anaerobia	32
3.7	Modelo termodinámico de los componentes del sistema de generación de potencia basado en una microturbina a gas con recuperación	33
3.7.1	Compresor	34
3.7.2	Recuperador.....	34
3.7.3	Filtro de NH ₃	34
3.7.4	Compresor biogás.....	34
3.7.5	Cámara de combustión	35

3.7.6	Turbina	36
4	CAPÍTULO IV: RESULTADOS	37
4.1	Potencial de residuo útil.....	37
4.2	Potencial de generación de biogás	39
4.3	Potencial energético	43
5	CONCLUSIONES.....	48
6	RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	49
7	BIBLIOGRAFÍA	50
8	ANEXOS	56
9	APENDICES	57
9.1	Estados en el sistema alimentado por pulpa	57
9.2	Estados en el sistema alimentado por mucilago	57

CAPÍTULO I

1.1 Introducción

El escenario energético mundial se ha ido reestructurando en los últimos años, esto debido al aumento en la demanda energética en el mundo [1], donde la mayor parte de esta energía consumida proviene de recursos fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural que según la *International Energy Agency* (IEA) [2], los cuales representan el 31,1%, el 28,9% y 21,4% respectivamente, generando un aumento en algunas problemáticas sociales, energéticas y ambientales como lo son el aumento de gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre. Para el año 2017, de acuerdo con REN21 *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century* [3] el 18,1% de la energía provino de fuentes renovables, donde el 7,5% corresponde al uso de biomasa tradicional principalmente usadas en zonas no interconectadas (ZNI) para la cocción de alimentos y generación de calor. El 10,6% restante corresponde al uso de tecnologías de generación de potencia, calor de proceso y biocombustibles, donde estos últimos han visto incrementada su demanda con el tiempo, en especial el uso de biogás que a lo largo de los años ha venido aumentando su participación en la generación eléctrica, al contrario de los biocombustibles líquidos que han visto su participación disminuida para esta aplicación específica [4].

Esta tendencia en el aumento de la demanda energética no es ajena para Colombia. Para el año 2000 el consumo de energía fue de 34 TWh mientras que para el año 2017 el consumo fue de 73 TWh [4], donde según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) [5] para agosto de 2018 el 69% de la capacidad instalada provino de recursos hídricos, mientras que los recursos fósiles solo representaron una participación del 28,1% y la biomasa, especialmente bagazo de caña y el biogás una participación casi nula del 0,81% y el 0,02% respectivamente. Se ha identificado que, esta gran dependencia energética de recursos hídricos puede ser contraproducente cuando se presenta el fenómeno del niño, momento en el que se hace necesario buscar otras fuentes de energía para garantizar la seguridad energética, entre estas, fuentes no convencionales.

El problema anteriormente mencionado podría tener efectos aún más adversos para la región cafetera, ya que el 86,16% de la capacidad instalada lo comprenden recursos hídricos mientras que sólo un 10,03% bagazo de caña, siendo su cosecha también afectada en épocas de sequía ya que disminuyen las condiciones adecuadas para garantizar su crecimiento [5]. De lo anterior, se identifica que, una alternativa para mitigar futuros inconvenientes asociados a garantizar la seguridad energética en esta región podría ser la de ajustar las condiciones técnicas y agrícolas para seguir la tendencia mundial donde biocombustibles como el biogás tienen mayor participación en la generación de energía eléctrica y calor de proceso, y teniendo en cuenta que el 15,47% de la producción nacional de café presenta en los departamentos de Caldas, Quindío y Risaralda, donde, residuos de este cultivo susceptibles a procesos de biodigestión anaeróbica para la obtención de biogás podrían

considerarse como fuente de energía para el autoabastecimiento y generación de potencia descentralizada [6].

Lo anterior se sustenta considerando que, en el proceso de transformación de café cereza a café pergamino seco se obtienen residuos que representan el 82,4% de su peso, siendo estos desaprovechados y desechados, cuya disposición final inadecuada, promueven un impacto ambiental equivalente a la contaminación generada durante un año por excretas y orinas por una población de 868.736 habitantes [7,8].

La presente investigación tiene como objetivo estimar el potencial energético de la región del Triángulo del Café, aprovechando la pulpa y el mucílago del café como materia prima en la producción de biogás para su posterior conversión energética en una microturbina a gas con recuperación de calor. Motivados por su posible implementación en zonas no interconectadas (ZNI) en base a las ventajas económicas y ambientales que trae la implementación de sistemas de generación de potencia a pequeña escala como son las microturbinas a gas en comparación con otras tecnologías de producción de energía a; su bajo mantenimiento, reducido peso y dimensiones, y su flexibilidad operativa, se visualiza como una posibilidad para aprovechar energéticamente la biomasa, ya que ha sido ampliamente reconocida el valor energético de esta, cuyo potencial puede suplir gran porción de los requerimientos energéticos de cierta regiones, con impactos menores al medio ambiente en comparación con los combustibles de origen fósil, así otorgando un valor agregado no solo económicamente, sino ambiental y de sostenibilidad a los residuos considerados desechos [9].

1.2 Planteamiento del problema

La energía es indispensable para la vida, pero escasea en poblaciones vulnerables en las ZNI de Colombia, que de acuerdo con el Informe de Rendición Social de Cuentas 2016-2017 del Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas (IPSE) y el Sistema Único de Información de la SSPD (SUI) [10], estas representan aproximadamente el 52% del territorio colombiano y en ellas se encuentra una población estimada de 1.900.000 habitantes [11]. Las ZNI no gozan de servicios públicos como gas natural, agua, internet o energía eléctrica, recursos críticos para el desarrollo social, económico y tecnológico de una región. Por otro lado, los altos costos en la inversión para el establecimiento de energías renovables, una posible solución a la problemática, ocasionan que su viabilidad a corto plazo se vea comprometida en el caso de las ZNI. Sumado a esto, la demanda energética nacional ha venido en crecimiento como consecuencia del crecimiento poblacional, lo cual induce un uso intensivo de energía eléctrica. Según pronósticos para el año 2025, la demanda de potencia eléctrica nacional media va a ser de 12.926 MW, y el aumento anual medio será del 3,25% [12]. Este aumento se ve reflejado directamente en el consumo de gas natural, ya que, en gran proporción, es utilizado para la producción de energía eléctrica en termoeléctricas donde se consumen aproximadamente 115×10^{10} Btu/día, lo cual representa el 12,7% de la energía eléctrica generada en el país [13].

De los 4,7 millones de hectáreas destinadas a actividades agrícolas en el país, 931.000 ha, lo que corresponde a aproximadamente el 20% del área cultivada, están destinadas al cultivo de café. Sabiendo que, y de acuerdo con Rodríguez A. *et al* [14], cerca del 81,5% del peso del café terminan siendo residuos de alto impacto ambiental, dado el uso intensivo de agua en la beneficiado húmedo a nivel industrial donde son utilizados aproximadamente de 40 a 50 L de agua por cada kg de café procesado [15]. Además, se ha identificado que, estas aguas quedan impregnadas de diferentes compuestos productos del proceso de lixiviado, los cuales alteran el pH de suelos y fuentes hídricas ya que poseen valores de pH de 5,5 a 6,2, una cantidad de oxígeno disuelto entre 1,9 a 4,2 mg/L; una demanda química de oxígeno (COD) de 1.986 a 9.360 mg/L; un contenido de sólidos totales de 532 a 1.620 mg/L, y una demanda biológica de oxígeno para aguas de despulpado y combinadas de 634 mg/L y 886 mg/L, respectivamente, valores que indican un alto potencial contaminante [14].

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general:*

Estimar el potencial energético del aprovechamiento de biogás obtenido a partir del proceso de biodigestión anaeróbica de residuos de café en un sistema de generación de potencia basado en una microturbina a gas.

1.3.2 *Objetivos específicos:*

1. Estimar el potencial productivo y el potencial energético bruto de los residuos del café susceptibles a ser transformados biológicamente mediante biodigestión anaeróbica.
2. Estimar el potencial de generación de biogás a partir de los residuos seleccionados y su poder calorífico.
3. Estimar el potencial energético del aprovechamiento de biogás en el sistema de generación de potencia basado en una microturbina a gas.
4. Realizar un análisis comparativo del aprovechamiento del biogás obtenido a partir de diferentes residuos.

1.4 Contribución

En este trabajo se presenta el estudio del aprovechamiento energético del biogás generado a partir de un proceso biológico de digestión anaerobia de la pulpa de café y mucilago para la producción de biogás y su aprovechamiento en un sistema de generación de potencia, el cual es una microturbina a gas. El sistema es presentado como una alternativa para la producción de energía eléctrica en ZNI al sistema eléctrico nacional que poseen disponibilidad local de dichos residuos, o en localidades como fincas.

A partir de los resultados del estudio del potencial productivo y el potencial energético de los residuos agrícolas seleccionados para ser aprovechados en procesos de digestión, se propone su uso en un sistema de microturbina a gas, el cual por medio de una cámara de combustión aprovecha el biogás producto del proceso de descomposición química y biológica de la biomasa. Basados en modelos matemáticos para el modelamiento de los diferentes componentes de la microturbina se realiza un análisis energético de todos estos, estableciendo la eficiencia energética del sistema y así cuantificar la porción del potencial energético bruto que es teóricamente aprovechable.

Se muestra la importancia que tiene la biomasa como una potencial fuente energía para sistemas de generación de potencia, debido a los retos que se van a presentar en el futuro relacionados a la seguridad energética además de garantizar la inclusión de zonas no interconectadas a las cuales se les debería garantizar sus necesidades básicas. La contribución de este trabajo tiene relevancia en las áreas de ingeniería mecánica y ciencias térmicas.

1.5 Estructura del documento

Este proyecto se ha estructurado en 6 capítulos que se describen a continuación. En el capítulo I se exponen los objetivos generales y específicos del estudio además de su contribución. En el capítulo II, se presentan la revisión bibliográfica de los antecedentes, el café en el mundo, Colombia y el Triángulo del Café, el proceso de cosecha y producción del café, los residuos generados por esta industria, también se presenta el proceso de biodigestión y de las tecnologías que aprovechan los productos de esta. El capítulo III muestra el proceso de selección de la biomasa, su caracterización fisicoquímica, analizamos potencial productivo de la zona cafetera, el modelamiento de la biodigestión anaerobia y el modelo termodinámico de todos los componentes del sistema de generación de potencia. En el capítulo IV se analizan los resultados obtenidos mediante el modelo construido en el software EES (*Engineering Equation Solver*) con el objetivo de analizar el potencial energético del sistema y como afecta a este algunas variables. En el capítulo V se exponen las conclusiones que se obtuvieron y finalmente, en el capítulo VI presentamos las recomendaciones a tomar en cuenta para investigaciones futuras.

CAPÍTULO II

2.1 Antecedentes

El gas natural es un combustible fósil y una mezcla de gases entre los que se encuentra en mayor proporción el metano. Las principales impurezas que puede contener son, vapor de agua, dióxido de carbono, nitrógeno, sulfuro de hidrógeno, helio, entre otros [16]. Este se forma por la descomposición de los sedimentos de materia orgánica atrapada en los estratos rocosos [17]. El biogás, a diferencia del gas natural, es un combustible no fósil el cual es el producto de la descomposición de la materia orgánica en ausencia de aire por la acción de microorganismos. El biogás es una mezcla de gases cuyos principales componentes son el metano y el dióxido de carbono [18]. En la naturaleza se encuentra una gran variedad de residuos orgánicos a partir de los cuales puede obtenerse tal mezcla combustible, entre ellos se encuentran: las excretas de animales domésticos como vacas, cerdos y aves; residuos vegetales como pajas, pastos, hojas secas y basuras domésticas.

El uso del metano a partir de la biodigestión anaeróbica data del año 1890, cuando Donald Cameron diseñó una fosa séptica de la cual, con el gas generado por descomposición, alimentó la red de alumbrado público de la ciudad de Exeter, en Gran Bretaña [19]. De acuerdo con investigaciones recientes, las excretas de los animales es la biomasa a partir de la cual se puede obtener un mayor volumen de metano por unidad de masa que entra en descomposición, dadas las adecuadas proporciones de sales minerales que estas poseen. Por otro lado, se ha identificado que la mayor producción de biogás se da a temperaturas elevadas entre los 50 °C y 60 °C por la acción de bacterias termofílicas aun cuando se presenta una alta sensibilidad a las fluctuaciones de temperatura del orden de 0,5 °C por hora [20], las cuales podrían inducir la inhibición del proceso. Entre febrero y octubre de 2009 Perrigault T. [21] inició investigaciones en el Perú con el objetivo de hacer una adaptación de un digestor de tipo tubular para las condiciones particulares de la sierra alta peruana, considerando que el uso de esta tecnología en zonas con una temperatura ambiente promedio anual muy baja del orden de 8 °C a 10 °C dificulta la conversión anaeróbica en un biodigestor al cual no se adiciona calor, acción que presupone un aumento de los costos del proyecto. Este estudio ayuda a entender que es posible adaptar biodigestores a zonas de bajas temperaturas, como lo son algunas de las ZNI de Colombia.

Actualmente, uno de los proyectos de mayor envergadura en Colombia asociado al uso de biogás producto de la biodigestión anaeróbica de residuos orgánicos, ubicado en Bogotá, en el relleno sanitario Doña Juana, aprovecha los desechos orgánicos de las basuras y los almacena en biodigestores especializados para la obtención de biogás, el cual es usado para la generación de energía eléctrica mediante un ciclo Rankine. La energía generada es utilizada para autoabastecer la planta y los excedentes, se venden a la red interconectada [22].

Actualmente, el mercado del gas natural en Colombia está representado por un 31,5% para uso industrial, 25% para el sector térmico, 19,1% para refinerías, 16,6% para el sector

residencial, 4,7% para el sector transporte, 3% para el sector comercial y un 0,14% para otras aplicaciones [23]. Como afirma Bolatturk A. *et al* [24] “El mundo no necesita disminuir el consumo energético, sino el de hacer un uso eficiente de la energía con el fin de asegurar un futuro sostenible”. De acuerdo con Echeverry J. [25] entre estos aspectos se cuenta el uso de combustibles con una baja o neutra huella de carbono como el biogás, cuya producción podría verse incentivada para su aprovechamiento en diferentes sectores considerando los pronósticos de un estado de superávit asociado al uso del gas natural como fuente de energía.

2.2 Biomasa

Se define como biomasa toda materia orgánica de origen biológico, tanto animal como vegetal. También se consideran los residuos orgánicos agrícolas y domésticos [26]. Tiene como característica principal el ser un recurso renovable, es decir, la tasa a la que esta se renueva es mayor a la tasa que esta se consume. Sin embargo, el hombre ha venido utilizando materia orgánica fosilizada, la cual a pesar de ser considerada biomasa no es renovable y que al quemarse genera un aporte de nuevo CO₂ a la atmósfera terrestre. Dicha circunstancia nos lleva al concepto de CO₂ neutro, en el cual conociendo que este gas cumple un ciclo biogeoquímico se busca que la liberación de este sea igual a cero, equilibrando la cantidad de dióxido de carbono retirado de la atmósfera o fijado por las plantas.

La importancia de la biomasa se da por el tratamiento posterior al que se disponga y su aprovechamiento energético. La UPME [27] define la energía de la biomasa como “energía obtenida a partir de aquella fuente no convencional de energía renovable que se basa en la degradación espontánea o inducida de cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico y toda materia vegetal originada por el proceso de fotosíntesis, así como de los procesos metabólicos de los organismos heterótrofos, y que no contiene o hayan estado en contacto con trazas de elementos que confieren algún grado de peligrosidad”.

Colombia tiene un gran potencial para la generación de biomasa debido a su alta variedad de cultivos e intensificación de procesos como la ganadería y la porcicultura. Según Rincón J. *et al* [28] “se encontró que el país posee un potencial teórico energético de 149.436 TJ/año de biomasa residual agrícola, pecuaria, agroindustrial y urbana. El potencial técnico, aprovechable hoy, corresponde al 26% de la demanda nacional de gas natural con respecto a datos del Balance Energético Colombiano. Las biomasas con mayor potencial de aprovechamiento son: vinaza de caña de azúcar, avícola, palma de aceite, residuos sólidos urbanos orgánicos y excretas porcinas. La ganadería tiene el mayor potencial teórico (71.771 TJ/año). Sin embargo, debido a que en el país se practica la ganadería extensiva, esto dificulta la recolección de las excretas”, además según el mismo autor, si se dispusiera toda la biomasa residual pecuaria y agrícola en biodigestores se obtendría una cantidad de biogás igual a la necesitada para la cocción de los alimentos, lo que permitiría desplazar el uso de gas natural el cual no es un recurso renovable y el cual no posee una huella de carbono neutra. A

continuación, en la Figura 1, se presenta la estructura de conversión de la de biomasa para la producción de biogás y otros productos y su aprovechamiento energético.

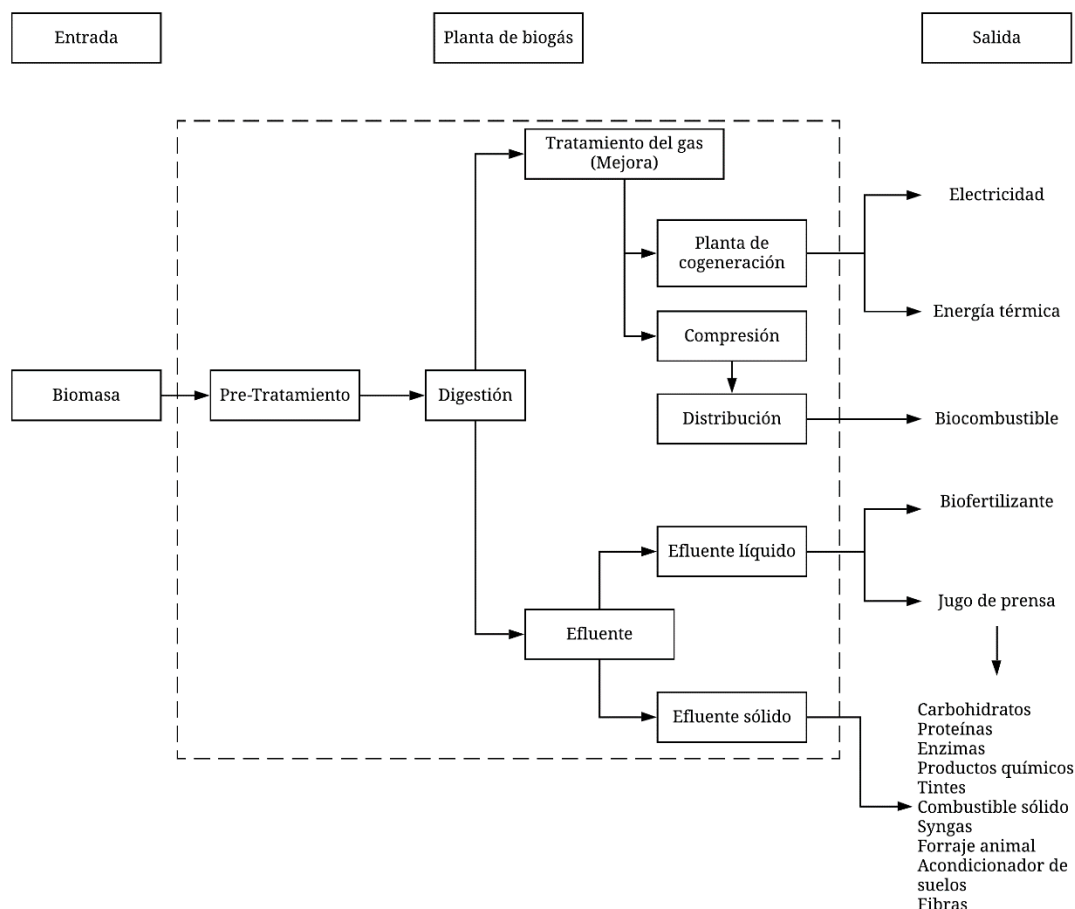


Figura 1. Cadena de producción del biogás. Adaptado de [27].

Como se observa en la Figura 1, la biomasa puede ser aprovechable si se somete a procesos de conversión biológica como lo es la digestión, la cual da como resultado varias especies químicas denominadas biogás y que entre sus componentes se encuentran el metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), amoníaco (NH_3), entre otros. El CH_4 es un gas inflamable con alto poder calorífico, el cual es usado como combustible para procesos de conversión energética. En el estudio presente se van a mostrar sus resultados como uso en un sistema de generación de potencia con la finalidad de obtención de energía eléctrica. Otro de los resultados del proceso de biodigestión es un biofertilizante, el cual es de amplio uso en la agricultura. Según lo plantea Rincón J. *et al* [28] en Colombia hay una cantidad anual de biomasa residual agrícola de 43.341.159 t/año, a continuación, en la Tabla 1, se muestra la cantidad anual de la biomasa residual agrícola procedentes de los cultivos más representativos de Colombia.

Tabla 1. Cantidad anual de la biomasa residual agrícola [28].

Sector	Residuo	Residuo t/año
Plátano	Fruta rechazo	23.816.051
Caña de azúcar	Bagazo	6.972.609
Palma de aceite	Laguna oxidación	6.709.985
Arroz	Paja	2.078.073
Banano	Fruto rechazo	2.067.945
Maíz	Caña	912.659
Caña panelera	Bagazo	364.066
Café pulpa	Pulpa	298.996
Café mucilago	Mucilago	102.243
Café borra	Borra	18.532
Total		43.341.159

Como se ve en la Tabla 1, el mayor aporte a la biomasa residual en Colombia la hace la fruta rechazo del plátano que representa cerca del 55% de la biomasa residual agrícola, seguido por el bagazo de la caña de azúcar que representa cerca del 16%. Como objeto de estudio se escogió la pulpa y el mucilago como materia prima para el proceso de conversión biológico, estos representan el 0,7% y el 0,24% respectivamente de la masa anual. Según McKendry P. [26] los investigadores dividen la biomasa en 4 grupos:

2.2.1 Clasificación de la biomasa:

La clasificación de la biomasa se establece en base solamente en su contenido de humedad, ya que esto dictamina el uso posterior de conversión de química que se le pueda dar, estos grupos son:

1. Plantas leñosas
2. Plantas herbáceas/pastos
3. Plantas acuáticas
4. Estiércol

Sin embargo, hay otros factores que se deben tomar en cuenta en esta clasificación aparte del contenido de humedad, especialmente en relación con esos que están en el medio de los dos extremos de seca y húmeda. entre esos factores están las cenizas, la alcalinidad y el contenido de celulosa que influencia los procesos de fermentación bioquímica.

Otros autores como Delgado R. [29] dicen que la biomasa se puede clasificar según su origen:

1. Biomasa natural.
2. Biomasa residual.
3. Cultivos energéticos.
4. Excedentes agrícolas.

Al ser la biomasa un compuesto orgánico se debe caracterizar para así saber la disposición a la que va a ser sometida y el comportamiento de esta. A continuación, se presenta la definición de las características fisicoquímicas que requiere el modelo empleado para determinar cómo se comporta la biomasa seleccionada

2.2.2 Caracterización fisicoquímica de la biomasa:

La caracterización del material consiste básicamente en la determinación analítica de parámetros fisicoquímicos. Para predecir el comportamiento de la biomasa en procesos de conversión biológica es necesario conocer algunas de sus características fisicoquímicas. En la Tabla 20, se presenta la variación en la producción del biogás en función de una de estas características. Para el caso del presente estudio, se escogió un modelo de biodigestión que contempla cuatro de estas características: la demanda química de oxígeno (COD), el contenido de materia orgánica seca (ODM), el contenido de nitrógeno orgánico (N_{org}) y los sólidos volátiles (VS). La estimación de estas características requiere conocer la composición elemental del sustrato. Kleerebezem R. y Van Loosdrecht M. [30], las definen como sigue:

- Demanda química de Oxígeno, (COD): Corresponde a la cantidad de oxígeno equivalente necesaria para oxidar todo el carbono orgánico en dióxido de carbono.
- Contenido de materia orgánica seca., (ODM): Corresponde típicamente al 50 - 90% en peso de la materia seca total (TDM). La diferencia entre los valores de TDM y ODM es la concentración de cenizas inorgánicas.
- Contenido de nitrógeno orgánico (N_{org}): Típicamente estimado a partir de la concentración total de compuestos de nitrógeno reducidos (llamado nitrógeno de Kjeldahl) menos la concentración de amonio (NH_4^{+1}).
- Sólidos volátiles (VS): Es la fracción de los sólidos o la porción de esta que se volatiliza a una temperatura de 550 ± 50 °C [31].

Además de las propiedades mencionadas los microorganismos involucrados en los procesos biodigestión anaerobia son susceptibles y por eso deben tener condiciones para que este proceso no se inhiba, tales condiciones son la humedad en donde Rabbani K. *et al* [32] proponen contenidos de humedad entre 50 y 70%, la relación carbono-nitrógeno que según Schattauer A. *et al* [33] los rangos óptimos van de 10 a 30 , el pH en donde según Gerardi M. [34] con valores entre 6,8 y 7,2 son óptimos, pero también asegura que con valores de 6,6 a 7,6 su producción continúa. Una de las biomásas que resulta de los procesos del café se llama la pulpa de café, este es un residuo generado del despulpado de café y que cumple con las características buscadas para un proceso de biodigestión anaerobia, más adelante se explican todas sus características y su procedencia.

2.3 Café

2.3.1 *Café en el mundo*

Este cultivo es el soporte económico de muchos países y el segundo producto más comercializado del mercado mundial, después del petróleo [35]. En la Tabla 2, se presentan los mayores productores de café a nivel mundial, liderado por Brasil que representa el 36,36% de la producción mundial, seguido por Vietnam con un 18,45% y Colombia con un 8,2%. El café se comercializa en sacos de 60 kg en las variedades arábica y robusta principalmente [36].

Tabla 2. Producción de café a nivel mundial [37].

País	2018 [saco 60 kg]	Producción mundial [%]
Brasil	61.444	36,36
Vietnam	31.174	18,45
Colombia	13.866	8,2
Indonesia	9.813	5,81
Etiopía	7.457	4,41
Honduras	7.328	4,34
India	5.325	3,15
Uganda	4.704	2,78
México	4.351	2,57
Perú	4.135	2,45
Guatemala	3.918	2,32
Nicaragua	2.510	1,49

2.3.2 *Café en Colombia*

Según *International Coffee Organization* (ICO) [38] Colombia es el tercer productor de café en el mundo, seguido por Indonesia y Etiopía [37] llegando a representar cerca del 80% de las exportaciones del país y siendo el cultivo más importante de la región Andina gracias a su carácter *perenne*, es decir, la capacidad de permanecer más de dos años y de producir semillas más de una vez en su vida; sumado a la permanente garantía de compra [39] lo cual representa cerca del 0.7% del PIB [40]. La participación del café en la economía de Colombia no es ni por poco despreciable. Colombia además de ser uno de los mayores productores a nivel mundial según la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, el café colombiano es de calidad sobresaliente. Soportando lo anterior, se afirma que: “Un factor clave en la calidad del café es el balance entre sus diferentes atributos y características, siendo el café de Colombia caracterizado por ser una bebida con una taza limpia, con acidez y cuerpo medio/alto, aroma pronunciado y completo” [41]. Según God F. y Ecorfan F. y la *International Coffee Organization* ICO [35,38], esto se explica debido a las excelentes condiciones geográficas que posee Colombia, alturas entre 900 msnm y 1.600 msnm,

temperatura ambiente entre 15°C y 24 °C, humedad relativa entre el 65% y el 90%, precipitación pluvial entre 1.500 y 2.000 mm/año y velocidad del viento menor a 30 km/h. en la Tabla 3, se muestra la producción de café en todos los departamentos del país considerando la información presentada en la base de datos de acceso libre Agronet del Ministerio de Agricultura Red de Información del Sector Agropecuario Colombiano [6], la cual centraliza información para la toma de decisiones de productores y usuarios del sector agrícola. Puede observarse que el mayor productor nacional de café es el departamento del Huila, el cual representa el 15,7% de la producción, seguido por Antioquia con el 15,3% y Tolima con un 11,9%. Entre estos, el Huila presenta el mayor rendimiento del cultivo, lo cual traduce en cuanto producto se obtiene por hectárea cultivada.

Tabla 3. Producción de café a nivel nacional [6].

Departamento	Área [ha]	Producción [t]	Rendimiento [t/ha]	Producción nacional [%]
Antioquia	108.520	116.862	1,1	15,3
Bolívar	872	652	0,8	0,1
Boyacá	9.701	7.664	0,8	1,0
Caldas	63.071	73.582	1,2	9,7
Caquetá	2.939	3.125	1,0	0,4
Casanare	2.359	1.958	0,8	0,3
Cauca	66.929	64.583	0,9	8,3
Cesar	24.112	16.054	0,7	2,1
Chocó	136	132	1,0	0,0
Cundinamarca	37.179	35.758	1,0	4,7
Huila	104.901	120.983	1,2	15,7
La Guajira	5.035	3.164	0,6	0,4
Magdalena	17.513	13.428	0,8	1,8
Meta	2.571	2.488	1,0	0,3
Nariño	29.264	31.042	1,1	4,1
Norte de Santander	25.107	16.758	0,7	2,2
Putumayo	2.165	1.480	1,0	0,2
Quindío	19.684	21.594	1,1	2,8
Risaralda	42.763	51.146	1,2	6,7
Santander	38.733	35.636	0,9	4,6
Tolima	94.254	91.827	1,0	11,9
Valle del Cauca	61.650	58.576	1,0	7,7

En la Figura 2, por medio de un análisis de Pareto se encontró que, de los 32 departamentos de Colombia, solo 7 departamentos representan el 80% de la producción de café promedio nacional entre los años 2007 y 2018. Entre estos se encuentran Caldas y Risaralda, pertenecientes al Triángulo del Café.

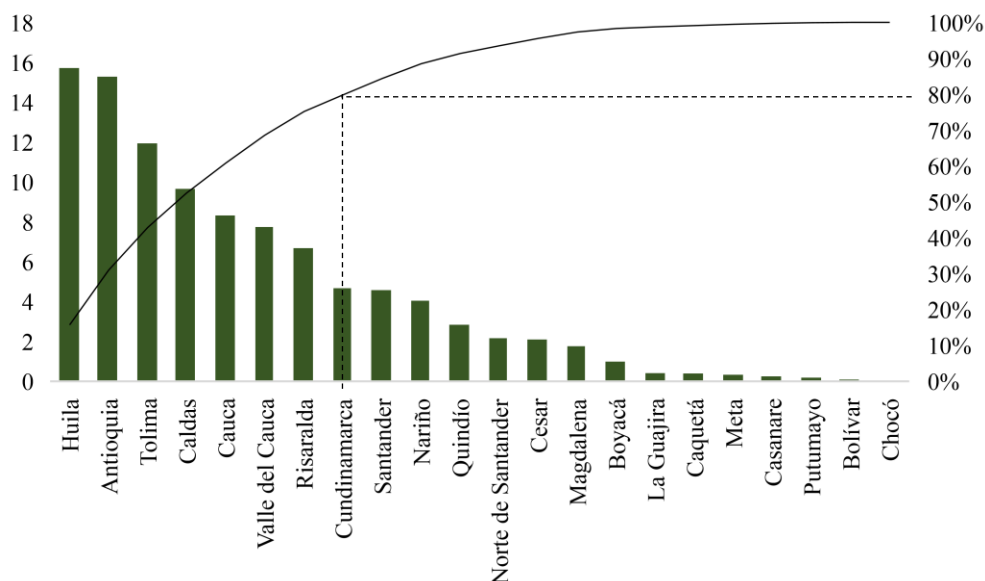


Figura 2. Diagrama de Pareto para la producción nacional de café.

2.3.3 Café en el Triángulo del Café.

En el 2018, según el Ministerio de Agricultura, el Triángulo del Café representó el 15,46% de la producción nacional del café, por debajo de Antioquia con 16,58% y Huila con un 15,91%, lo cual representó un PIB por departamento para Caldas, Quindío y Risaralda de 3%, 1,7% y 2% respectivamente [42]. Tomando como base el análisis de Pareto de la Figura 2, en la Tabla 4, se hace un comparativo de los principales productores de café en Colombia, tomando los departamentos de Caldas, Quindío y Risaralda de manera conjunta como el Triángulo del Café y así, identificando esta región como el tercer productor nacional y el segundo con el mejor rendimiento de cultivo, representado en 1,28 toneladas por hectárea cosechada.

Tabla 4. Producción de café a nivel nacional en el año 2018 [6].

Departamento	Área [ha]	Producción [t]	Rendimiento [t/ha]	Producción nacional [%]
Antioquia	98.038	141.899	1,45	16,58
Huila	122.002	136.162	1,12	15,91
Triángulo del Café	103.012	132.329	1,28	15,46
Cauca	82.086	102.147	1,24	11,94
Tolima	97.304	97.451	1,00	11,39

2.4 Proceso del café

El café para ser el producto que hoy conocemos en diversas presentaciones para su consumo debe pasar una serie de etapas: recolección, beneficiado, el cual, en Colombia, puede ser de

dos tipos, húmedo o seco; seguido de un proceso de torrefacción, el cual agrupa cuatro fases: trilla, tostado, enfriado y molienda.

Según investigaciones de Puerta G. [43] el beneficio por vía seca da muy malas características al café, entre estas se ven afectadas: la intensidad de aroma, el aroma, la acidez, el amargor y el cuerpo e impresión global; dando como resultado sensaciones de rechazo, esto debido que sensiblemente se desarrollan sabores y aromas a fermento y *stinker*. Por otro lado, el café procesado por vía húmeda da mejores resultados, esto muestra por qué la mayoría de las fincas según Aristizábal C. y Duque H. [44] realizan el beneficio por vía húmeda, quienes también dicen que los defectos que se presentan en el grano de café ocurren debido a inconvenientes en el proceso. Un buen proceso del café le garantiza al productor un margen de ganancia por la venta de café, que no depende solamente de cómo se realice el proceso sino también del uso racional de los recursos e insumos empleados. Puerta G. [45] quien es una investigadora química para Cenicafe recomienda las buenas prácticas agrícolas, de las cuales también depende la buena calidad del café producido y así mantener su inocuidad y calidad en los procesos realizados en las fincas. Actualmente existen regulaciones para el café sobre uso de varios agroquímicos como herbicidas, fungicidas, insecticidas y también en cuanto a contenidos de ochratoxina A (OTA). También recomienda las instalaciones que debe tener una finca para el proceso del café, los cuales contemplan: cuartos para el personal, suministro de agua, beneficiadero de la finca, áreas de secado, áreas de manejo de residuos, áreas de almacenamiento de café, áreas de almacenamiento de insumos, materiales y agroquímicos. A continuación, en la Figura 3, un esquema simplificado donde se muestran las etapas del café.

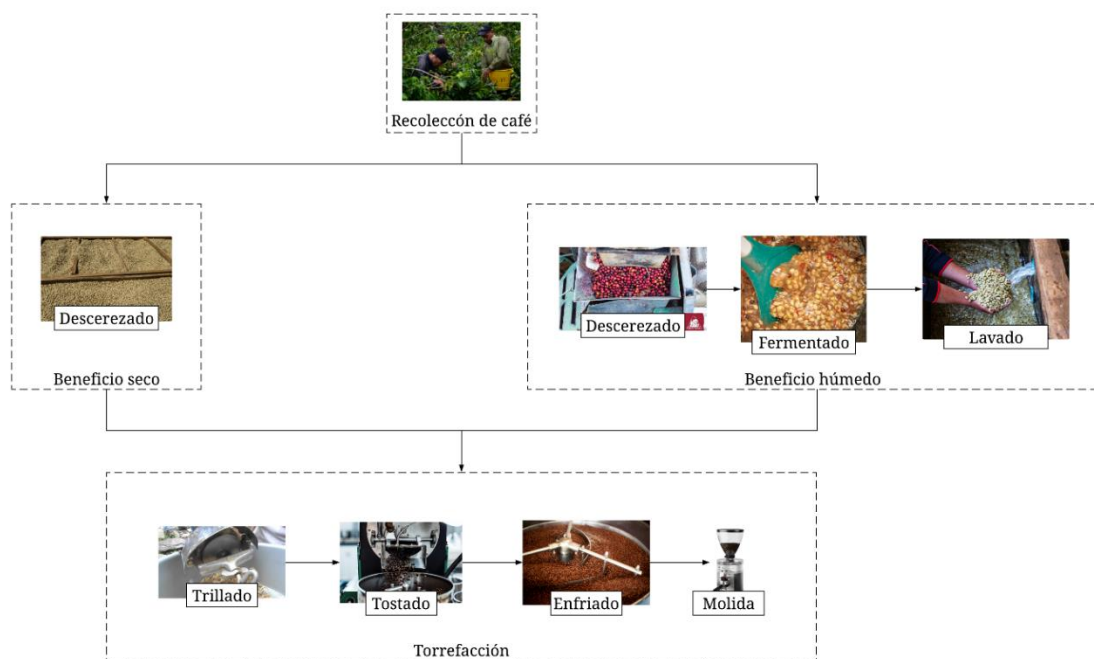


Figura 3. Esquema gráfico del proceso del café.

2.4.1 *Recolección de café*

En este proceso se recolecta el café del cafeto, en donde solo se busca obtener el fruto ya madurado de color rojo o amarillo, ya que el verde daña el sabor del café en la taza y según lo explica Cenicafe [46], se hace manualmente por un recolector, el cual recolecta uno a uno el café y lo deposita temporalmente en un recipiente que cuelga de su cintura. Actualmente, no existe máquina diseñada para llevar a cabo esta labor dadas las condiciones colombianas, donde la no uniformidad en la maduración del fruto hace que esta sea una limitante para la aplicación de tecnologías que en otros países son efectivas. En términos generales, la cosecha no es tan eficiente como otros procesos que involucran el procesamiento del café.

2.4.2 *Beneficio de café*

El proceso de beneficio de café consiste en un conjunto de operaciones para transformar el café verde en café pergamino, el cual es el que se comercializa en Colombia debido a su estabilidad. Este proceso se realiza tanto por los caficultores en las instalaciones que tienen en sus fincas al cual llaman beneficiadero, como en industrias de beneficiado, en donde se realiza el recibo, despulpado, remoción de mucilago, lavado, secado y las diversas clasificaciones. En Colombia se realiza mayoritariamente el beneficio húmedo [44], el cual comprende las siguientes etapas: despulpado, Remoción del mucilago, por fermentación natural o remoción mecánica, seguido del lavado y secado. A continuación, en base a la Norma Técnica Colombiana (NTC) 3314 [47], se describen cada uno de los procesos del beneficiado:

2.4.2.1 *Beneficio Húmedo*

El beneficio por vía húmeda es el que más se acostumbra a realizarse en Colombia y en los tipos de café de procedencia arábica. Según dice la NTC 3314 [47] “El tratamiento de las cerezas de café consiste en la eliminación mecánica del exocarpio en presencia de agua, eliminación de todo el mesocarpio por fermentación seguido por secado para la producción de un café pergamino.”

2.4.2.2 *Beneficio Seco*

El beneficio seco es aquel en el cual los granos recolectados son puestos a secar bajo el sol, o por una máquina de secado, esto con el objetivo de bajar su contenido de humedad para así lograr que en el proceso de trilla quede únicamente el café almendra. Según la NTC 3314 [47] “es un tratamiento que consiste en secar cerezas de café para obtener café en cáscara, seguido por la eliminación mecánica del pericarpio seco para producir café verde.”

2.4.3 *Torrefacción*

Esta es la operación en la cual se le da por acción de calor las cualidades aromáticas que no existen previamente en el café verde. Consiste en calentar los granos de café con el objetivo

de obtener una modificación química, física y fisicoquímica en la búsqueda por obtener infusiones cuyas cualidades en taza sean satisfactorias. Además de aplicarle calor, posteriormente se muele. Este proceso es una operación mecánica destinada a producir la fragmentación de los granos de café tostado y es de gran importancia para la preparación de un buen café, ya que, dependiendo de este, se da la exitosa extracción de sus características asociadas a tamaño y forma de partícula uniformes [48].

En cada uno de estos procesos se generan residuos, que como ya se ha explicado anteriormente, si no son dispuestos adecuadamente inducen un impacto ambiental indeseado. Por esta razón, muchos de estos son reutilizados en los mismos procesos, mientras que otros, si bien no son ampliamente utilizados, podrían ser aprovechados en procesos de conversión energética.

A continuación, se explican los residuos generados por la industria cafetera y su posible aprovechamiento en un proceso de conversión energética.

2.5 Residuos generados por la industria cafetera

Se estima que cerca del 5% del café es aprovechable para la bebida, el resto son residuos de materiales lignocelulósicos como hojas, ramas, tallos, frutos verdes que se desprenden en la recolección o que se retiran de la masa de café recolectado, la pulpa o exocarpio del fruto, lo cual representa casi un 44% del peso del fruto fresco, y la borra, el cual es un residuo que se genera en fábricas de preparación de café soluble y cuando es preparada la bebida a partir del grano tostado y molido, representa un 10% del peso del fruto fresco. A continuación, se presentan los principales residuos de café y sus formas de aprovecharlos [7].

1. *Pulpa de café*: Es el primer residuo que se obtiene del procesamiento de café después del proceso de despulpado y representa cerca del 47,2% de los residuos. Esta puede ser materia prima para la generación de biogás y bioetanol. Según Cruz R. [49], se reportan rendimientos de 322,46 L/kg con contenidos de CH₄ del orden de 70,61% para procesos de biodigestión.
2. *Mucilago*: Es generado en la etapa de desmucilaginado y representa en base húmeda cerca del 18,5% de los residuos. Por cada millón de sacos de 60 kg de café que Colombia exporta, se generan aproximadamente 55.500 t de mucilago fresco, que si no se utilizan adecuadamente promoverían un impacto ambiental equivalente a la generada en un año por las excretas y orina de una población de 310.000 habitantes. Al igual que la pulpa, esta puede ser materia prima para la generación de biogás y bioetanol. Según Rodríguez Valencia N. y Zambrano Franco D. [7], se reporta una producción de 336 L de CH₄ por cada 1 kg de COD removido y 58,37 ml de etanol obtenido a partir de 1 kg de mucilago fresco.

3. *Borra de café*: Residuo que se genera en las fábricas de café soluble y cuando se prepara el café colado. Corresponde a la fracción insoluble de café molido y representa cerca del 10% del peso del fruto fresco. La borra de café en las industrias de café soluble luego del proceso de prensado y secado con una humedad entre el 8% y el 15%, es usado como combustible para las calderas generadoras de vapor de agua y, según lo reportado por Rodríguez Valencia N. y Zambrano Franco D. [7], su poder calorífico inferior (PCI), se encuentra entre 24,91 MJ/kg y 29,01 MJ/kg de borra seca.
4. *Ripios y café deteriorado*: Son residuos del proceso de trilla y es constituido por granos imperfectos, almendras partidas y frutos pequeños, y pueden ser usados como combustible directo y como materia prima para la producción de biodiesel.
5. *Cisco de café*: Constituido por la cascarilla de café y la película plateada, este residuo posee excelentes propiedades combustibles. Representa cerca del 4,2% del peso en fruto fresco y al ser un residuo con baja humedad su uso es para la combustión directa.

A continuación, en la Figura 4, se muestra un corte transversal del grano de café con los y la clasificación de cada una de sus partes con su respectivo residuo.

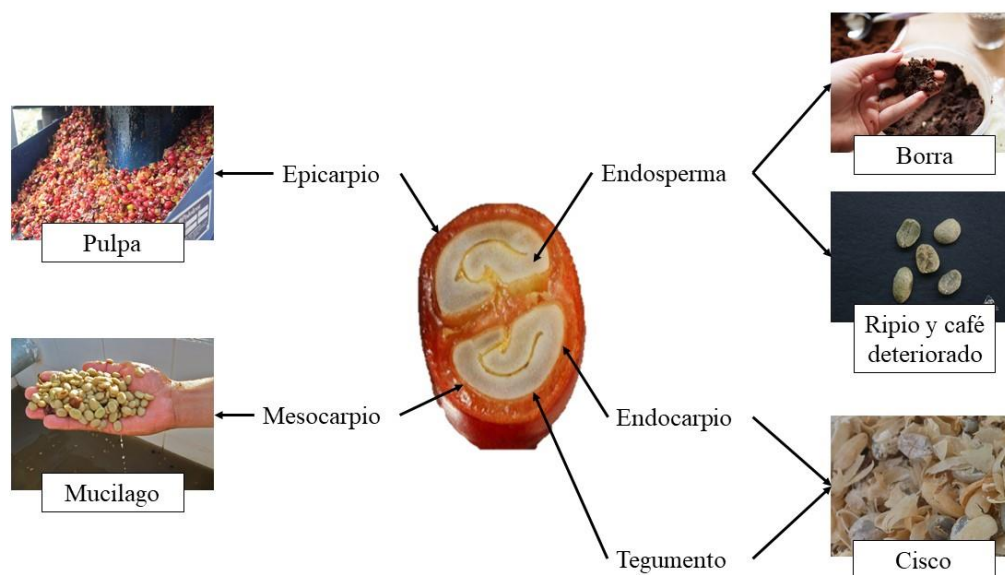


Figura 4. Partes del café con su respectivo residuo.

A continuación, en la Tabla 5, se presentan las cantidades de residuo cuando se procesa 1 kg de café considerando cada una de las etapas del beneficiado e industrialización:

Tabla 5. Residuos obtenidos en el proceso de beneficio e industrialización de 1kg de café cereza [7].

Proceso	Residuo obtenido	Pérdida [g]
Despulpado	Pulpa fresca	436
Desmucilaginado	Mucilago	149
Secado	Agua	171
Trilla	Pergamino	42
	Película plateada	
Torrefacción	Volátiles	22
Preparación bebida	Borra	104
Pérdida acumulada		924

Como se observa en la Tabla 5, la pulpa representa el mayor porcentaje de residuo generado en comparación a los demás posibles y representa casi 3 veces más en valor en peso al del mucilago y 10 veces más al del pergamino y película plateada. Según Alfaro M. y Rodríguez J. [14], las distintas aguas generadas en el proceso de beneficio proceso, específicamente, durante el despulpado, el lavado, la recirculación de agua-pulpa y aguas combinadas, presentan un pH entre el 5,5 y el 6,2; una cantidad de oxígeno disuelto entre 1,9 y 4,2 mg / L; una demanda química de oxígeno (COD) entre 1.986 y 9.360 mg/L; un contenido de sólidos totales entre 532 y 1.620 mg/L, y una demanda biológica de oxígeno para aguas de despulpado y combinadas entre 634 mg/L y 886 mg/L, respectivamente. Por otro lado, se indican valores promedio de la demanda bioquímica de oxígeno del orden de 3.600 mg/L para las aguas residuales o mieles de café, siendo la demanda química de oxígeno un parámetro importante dado que establece el grado de contaminación del agua [50]. Así mismo, según la resolución No. 0631 del 17 de marzo de 2015 [51], se establecen límites para la COD del orden de 3.000 mg/L para el beneficio ecológico y de 650 mg/L para el beneficio tradicional. Generalmente, estos valores son sobrepasados por las aguas residuales del proceso del café. Por esta razón, estas deben ser sometidas a procesos de remoción de COD para poder ser vertidas a afluentes de agua. Entre estos procesos se encuentra la biodigestión anaerobia, mediante el cual Molina A. y Villatoro R. [31], reportan remociones de la COD del 60 al 85%.

2.5.1 Disposiciones para la pulpa de café

Al ser la pulpa de café el residuo más generado en el proceso cafetero se les ha obligado a las fincas productoras a darle usos adecuados a esta biomasa, ya que como fue mencionado cuando se vierte directamente al medio ambiente sin ningún tipo de tratamiento previo afecta en gran magnitud el ecosistema por sus características contaminantes. Según Aristizábal C. y Duque H. [44], los cuales iniciaron investigaciones sobre las disposición dada a la pulpa en 5 departamentos cafeteros de Colombia, arrojando los siguientes resultados:

- Fosa: Representa un 72,6% de la disposición y consiste en construcciones especiales, siempre techadas donde se almacena y se desarrolla una descomposición adecuada de

la pulpa para su posterior uso. Cuando su descomposición es completada se usa como abono para los cultivos [52].

- Pila: Representa un 16,2% de la disposición y consiste en apilar la pulpa sin ningún tipo de construcción o adecuamiento, este tipo de disposición es incorrecto ya que los lixiviados de la pulpa y la pulpa misma al estar en contacto con el medio ambiente genera contaminación.
- Lote: Representa un 7,4% de la disposición, consiste en el uso directo de la pulpa como abono de los cultivos sin ningún tratamiento previo.
- Lombricultivo: Representa un 2,7% de la disposición, es el cultivo de la lombriz roja *Eisenia foetida* en los residuos para la obtención de lombricompost. También consta de una construcción de lechos, los cuales deben estar techados y con cerramientos laterales para evitar la entrada de aves y otros depredadores de la lombriz [52].
- Ningún uso: Representa el 0,9% de la disposición.
- Vertimiento a quebradas: Representa un 0,33% de la disposición y es de gran problemática ambiental, ya que como es mencionado anteriormente es legislado y según la resolución No. 0631 del 17 de marzo de 2015 [51] las fincas deben tener postratamiento de sus residuos para que estos no sobrepasen unos límites de contaminación.

Las disposiciones son básicamente tratamientos para su estabilización química y posterior uso como fertilizante, pero hay un tratamiento el cual se propone en este estudio, dando otro beneficio adicional al de generación de fertilizantes, y es la generación de un gas combustible llamado biogás, este proceso va a ser explicado a continuación.

2.6 Biodigestión

En el ambiente muchos contaminantes en el agua son removidos gradualmente por procesos que ocurren a nivel físico, químico y biológicos. En sistemas ingenieros los mismos procesos son llevados a cabo en tanques llamados reactores, en donde el contenido orgánico es sometido a un crecimiento bacteriano controlado, el cual ayuda a reducir la cantidad de lodos orgánicos y desechos solubles. Si la actividad bacteriana es anaeróbica, la reducción en el contenido orgánico es conseguida a través de la digestión de lodos. Si la actividad bacteriana es aeróbica, la reducción en el contenido orgánico es conseguida por la estabilización de lodos. La velocidad a la cual estos procesos se produzcan depende de las características de la biomasa usada y las condiciones a las cuales esté el reactor [34,53].

El alto costo de los fertilizantes químicos, la búsqueda de fuentes alternativas de energía y la necesidad de vías de descontaminación y eliminación de residuos da un impulso al correcto manejo de los residuos orgánicos a través de tratamientos que transforman la materia orgánica residual en productos con un valor agregado. Un papel importante en la transformación de estos residuos lo tienen los microorganismos que facilitan la descomposición de la materia, especialmente si se tiene en cuenta que disponen de un amplio rango de respuestas frente a la molécula de oxígeno. Con el objetivo de tratar adecuadamente los residuos orgánicos se elaboran bioprocesos en función de la presencia o ausencia de oxígeno [54] , los cuales son explicados a continuación.

2.6.1 *Biodigestión aerobia*

La biodigestión aerobia consiste en procesos realizados por bacterias y protozoos, los cuales en presencia de oxígeno descomponen en la materia orgánica en inocuos y materia celular. La principal ventaja de la digestión aerobia es la simplificación de la disposición de los lodos, comparándola a la digestión anaerobia. En la digestión aerobia cerca del 50% de la energía disponible por oxidación es consumida para el crecimiento bacteriano [54].

2.6.2 *Biodigestión anaerobia*

La digestión anaerobia es un proceso sin la presencia de oxígeno llevado a cabo por microorganismos sensibles al oxígeno, en el cual los componentes orgánicos de una sustancia son transformados en biogás, una mezcla combustible gaseosa de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y otros compuestos, en donde se destruye porción de los sólidos volátiles (VS) en lodo y se minimiza la facilidad putrescible de este, es decir, que tan fácil se puede pudrir. Otro de los productos es un lodo inocuo digerido, un subproducto el cual contiene todos los microorganismos responsables de este proceso, dicho lodo es útil para la fertilización. En este tipo de digestión, más del 90% de la energía disponible por oxidación se convierte en metano, mientras que solo el 10% se consume en el crecimiento bacteriano y ha sido evaluado como uno de los procesos más eficientes energéticamente y como una tecnología beneficiosa para el medio ambiente para la producción de bioenergía [55].

Para que el proceso de digestión sea estable y eficiente se requiere que las bacterias encuentren cierto equilibrio, ya que cambios ambientales, químicos entre otros pueden afectar este equilibrio, causando la acumulación de ciertas sustancias que inhiben el proceso global [21,34,54].

Es uno de los procesos más antiguos empleados para la estabilización de lodos y su principal aplicación es la estabilización de lodos concentrados producidos en el tratamiento de agua residual y de determinados residuos industriales, además del tratamiento de residuos orgánicos diluidos [56].

2.7 Etapas de la fermentación metanogénica

La digestión anaeróbica es un proceso muy complejo por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar, pero los estudios actuales la dividen en cuatro etapas, las cuales son [54]:

1. Hidrólisis
2. Etapa acidogénica
3. Etapa acetogénica
4. Etapa metanogénica

2.7.1.1 *Hidrólisis*

En esta etapa se transforma la materia orgánica compleja en compuestos solubles para que así puedan ser degradados anaeróbicamente. Este es un proceso limitante en cuanto al tiempo, ya que si se tratan de sustratos con alto contenido de sólidos el proceso podría tomar más tiempo. Este proceso es función de la temperatura, el tiempo de retención hidráulico, la composición bioquímica del sustrato, el tamaño de partículas, el pH, la concentración de NH_4^+ y de la concentración de los productos de la hidrólisis.

2.7.1.2 *Etapa fermentativa o acidogénica*

Durante esta etapa se fermentan las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados por las bacterias metanogénicas y en compuestos orgánicos más reducidos que tienen que ser oxidados por las bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. Además, en esta etapa se elimina cualquier traza de oxígeno que exista disuelto en el sistema. Este grupo de microorganismos está compuesto por bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, denominadas bacterias formadoras de ácidos.

2.7.1.3 *Etapa acetogénica*

Mientras algunos productos resultantes de la etapa anterior pueden ser metabolizados directamente en la etapa metanogénica, existen otros productos que no, como los son, el etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos. Estos deben ser convertidos en compuestos más sencillos como acetato e hidrógeno a través de bacterias acetogénicas también llamadas homoacetogénicas, las cuales no producen hidrógeno como las bacterias acetogénicas, sino que lo consumen bajando sus presiones parciales, permitiendo así, la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas. En esta etapa la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todos los compuestos orgánicos que podían ser utilizados por estas de la biomasa y como resultado de su metabolismo eliminan sus propios productos

de desecho fuera de sus células. Estos productos son ácidos volátiles sencillos, los cuales son utilizados en la etapa metanogénica como sustrato a las bacterias de esta.

2.7.1.4 Etapa metanogénica

Es el proceso más importante, ya que en este se lleva a cabo la formación de metano y la eliminación de los productos remanentes de los grupos de bacterias de etapas anteriores. En las etapas precedentes a la metanogénica se acondiciona el sustrato para ser transformado en una mezcla gaseosa compuesta por CH_4 , CO_2 y otras especies químicas. Inicialmente este sustrato de cadenas moleculares complejas se convierte en un sustrato monocarbonado o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente. Así mismo, se ha demostrado que el 70% de metano generado en el proceso se forma a partir de la descarboxilación de ácido acético, donde el metano restante proviene de los sustratos de ácido carbónico, ácido fórmico, y metanol. A continuación, en la Figura 5, se muestra un esquema simplificado donde se describen todas las etapas:

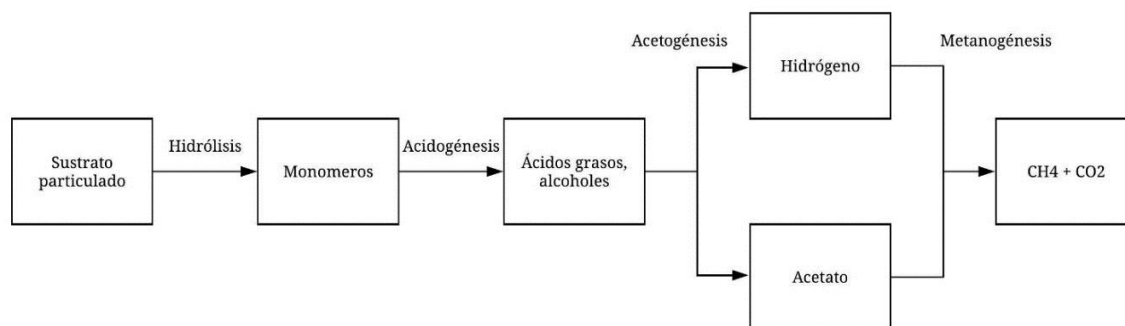


Figura 5. Esquema simplificado de las etapas de biodigestión anaerobia.

Dado que los microorganismos son altamente susceptibles a los cambios en condiciones de temperatura y pH, en especial los metanogénicos, es importante evaluar y controlar estos parámetros que gobiernan el proceso. La tecnología anaerobia necesita de un monitoreo cuidadoso, ya que el desempeño de esta se mide generalmente en función de la tasa de producción de metano.

2.8 Factores determinantes en el proceso metanogénico

2.8.1 Temperatura

Tres temperaturas gobernantes pueden ser distinguidas en el proceso de digestión anaeróbica, las cuales son, mesofílica entre 20 °C y 40 °C y termofílica 45 °C y 65 °C. Los reactores pueden operar entre estos valores efectivamente, pero las temperaturas óptimas para la subsistencia y desarrollo de los organismos mesofílicos y termofílicos son 35 °C y 55 °C, respectivamente [57].

Como se observa en la Figura 6, las producciones por debajo de la temperatura optima tienden a aumentar al incrementar la temperatura, pero una vez se pasan estas temperaturas, la producción decrece con rapidez. También se observa que los microorganismos termofílicos poseen mejores rendimientos que los organismos mesofílicos en las temperaturas optimas, pero en temperaturas mesofílicas los organismos termofílicos poseen menor rendimiento que los organismos mesofílicos. Esto se explica debido a la dominancia de los organismos mesofílicos a temperaturas moderadas.

Se desprecia el aumento de temperatura por la actividad biológica, pero como el biogás producido durante la digestión anaeróbica está saturado por agua, se da un descenso de las temperaturas del biodigestor. Esto quiere decir que para la mayoría de los biodigestores el sustrato debe ser calentado para mantener así las temperaturas requeridas por los organismos termofílicos o mesofílicos.

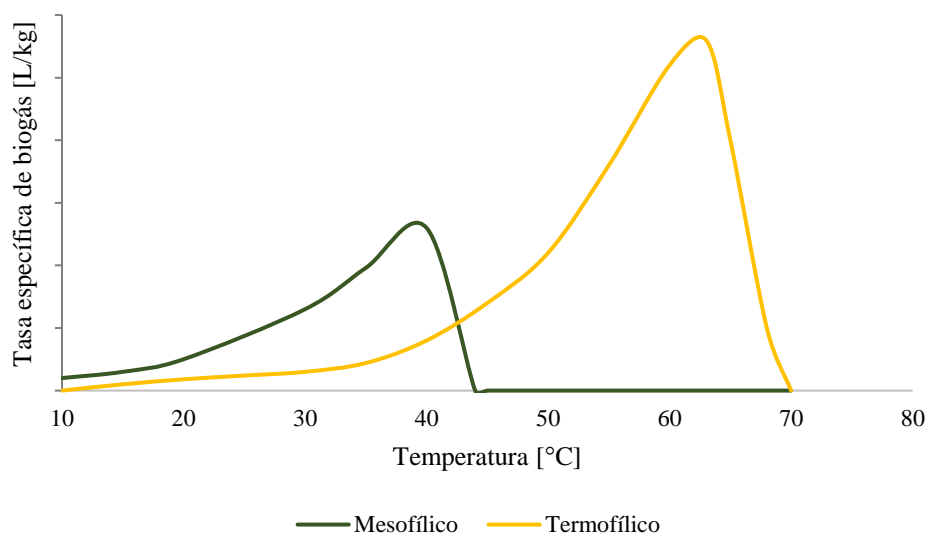


Figura 6. Rango de temperaturas de la biodigestión anaerobia. Adaptado de [57].

En la práctica, los biodigestores pueden operar tanto a temperaturas mesofílicas como termofílicas. Sin embargo, los tiempos de retención hidráulica son menores a temperaturas termofílicas, entre 10 y 20 días que en las mesofílicas, entre 20 y 40 días, debido a la diferencia en la tasa de conversión de la biomasa [57].

2.8.2 Velocidad de carga volumétrica

Según Hilbert J. [20], este parámetro designa cuanto volumen de sustrato es cargado diariamente al digestor y tiene una relación inversa con el tiempo de retención hidráulica, ya que a medida que incrementa el valor de carga volumétrica, disminuye el tiempo de retención. Este parámetro tiene varias formas de expresarse, siendo las más comunes: kilogramos de material/día; kilogramos de materia seca/día; kilogramos de sólidos volátiles/día, todos estos expresados en metros cúbicos en el digestor.

2.8.3 *Tiempo de retención hidráulica*

Este parámetro solo puede ser definido de forma clara en los sistemas de biodigestores tipo “*batch* o discontinuos”, en donde el tiempo de retención hidráulica (TRH) coincide con el número de días que el sustrato permanece dentro del digestor. Este parámetro es función del tipo de sustrato y la temperatura. Una mayor temperatura disminuirá los tiempos de retención. Por esta razón, se busca optimizar la temperatura y los tiempos de retención hidráulica para una buena relación costo / beneficio [20].

2.9 **Productos de la biodigestión anaerobia**

En la biodigestión anaeróbica los principales productos en sistemas de alta carga orgánica y mezcla completa son el biogás utilizado como combustible y un bio abono o lodo residual orgánico estabilizado que es utilizado principalmente como acondicionador y/o fertilizante de suelos.

2.9.1 *Bio abono*

Según el manual del biogás [54], las características de este producto dependen en gran medida del tipo de sustrato usado para la digestión y del tipo de tecnología utilizada. El contenido de materia orgánica es inferior al de la materia prima, esto debido a que, durante el proceso, parte de la materia orgánica es transformada en metano y gran parte de esta materia orgánica se mineraliza, lo que en consecuencia contribuye al aumento del contenido de nitrógeno amoniacal y la disminución del nitrógeno orgánico. Al nitrógeno orgánico lo componen moléculas orgánicas como las proteínas, los ácidos nucleicos o metabolitos finales como la urea y el ácido úrico. Este es una materia orgánica sujeta al consumo de microorganismos, los cuales al procesarlo eventualmente lo convertirán en nitrógeno amoniacal, a la combinación de ambos se le conoce como nitrógeno Kjeldahl.

2.9.2 *Biogás*

Es el gas combustible que se obtiene en medios naturales o a partir de la fermentación de biomasa. Posee concentraciones en mayor proporción de metano, dióxido de carbono y otras especies químicas como nitrógeno, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno [18]. Según Deublein D. y Steinhauser A. [58], si el biogás tiene un contenido de CH₄ mayor al 45% es inflamable. En muchos casos el biogás debe ser tratado para usos específicos, como lo son por ejemplo el uso en motores, celdas de combustible, calderas. El tratamiento consiste en dos procesos: la limpieza del biogás, y la mejora del biogás. La limpieza consiste en hacer una remoción de productos corrosivos como el sulfuro de hidrógeno, agua y partículas mientras que la mejora consiste en la remoción de CO₂ para incrementar el nivel energético del biogás.

Entre los tratamientos del biogás se encuentran la remoción de dióxido de carbono, absorción, adsorción con tecnología de oscilación de presión, tecnología de diafragma, mineralización y biomineralización, purificación criogénica del biogás, remoción del agua, remoción del

sulfuro de hidrógeno, desulfuración biológica, precipitación de sulfuros, absorción en una solución férrica quelante, adsorción de compuestos de hierro, adsorción de carbón activado, enlace químico con zinc, remoción de oxígeno y remoción del amonio. A continuación, en la Tabla 6, se muestran los gases con sus respectivos rangos de porcentajes:

Tabla 6. Rango de los gases que componen el biogás para diferentes biomásas [59].

Especie	Desechos domésticos	Lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales	Residuos agrícolas
CH ₄ [%]	50-60	60-75	40-70
CO ₂ [%]	38-34	33-19	30-60
N ₂ [%]	0-5	0-1	0-1
H ₂ S [%]	0,01-0,09	0,1-0,4	0,3-1

Una de las propiedades que tiene el biogás es el de ser una sustancia con huella de carbono neutra, así mismo, la liberación de CO₂ tras la combustión inhibe la liberación de CH₄ directo a la atmósfera, el cual es potencialmente más contaminante que el CO₂ desde un enfoque asociado al índice GWP (*Global Warming Potential*), el cual es una medida relativa de cuanto calor puede ser atrapado por ciertos gases de efecto invernadero tomando el valor de CO₂ como referencia en base másica, donde son tomados varios parámetros para cuantificar este valor, entre los cuales están la absorción de la radiación, la vida en la atmósfera de las especies y la ubicación del espectro de absorción de las longitudes de onda. Es medido en una escala normalmente de 20, 100 o 500 años [60,61]. Entre estas sustancias está el CH₄, el cual según el último reporte de *Greenhouse Gas Protocol* [62] tiene un índice GWP de 28, lo cual significa que 1 kg de CH₄ atrapa 28 veces la cantidad de calor en un lapso de 100 años, comparándolo con la cantidad que atraparía 1 kg de CO₂ en el mismo período de tiempo si estos fueran liberados a la atmósfera. El CH₄ corresponde el 17% de los gases de efecto invernadero que se liberan [63].

2.9.2.1 Propiedades del biogás

En la Tabla 7, se muestran algunas de las propiedades del biogás, como poder calorífico, el cual es un parámetro de gran relevancia en el momento de decidir si este es apto para su uso como combustible en un ciclo de generación de potencia.

Tabla 7. Propiedades de los gases que componen el biogás. Adaptado de [63,64].

Propiedades	CH ₄	CO ₂	H ₂	H ₂ S	Biogás
% Volumen	50-70	25-50	1-3	0,1-0,5	-
Valor calorífico [MJ/m ³]	35-50	-	10,8	-	20-26
% ignición aire	5-15	-	-	-	6-12
Temperatura ignición aire [°C]	65-750	-	-	-	650-750
Presión crítica [MPa]	4,7	7,5	1,2	-	7,5-8,9
Densidad nominal [kg/m ³]	0,67	1,84	0,08	1,43	1,25
Inflamabilidad [% Vol]	5-15	-	-	-	6-12

Como se muestra en la Tabla 7, el biogás tiene características como el poder calorífico aptas para su uso como combustible en ciclos de generación de potencia. A continuación, se explicarán las tecnologías para el aprovechamiento energético de este.

2.10 Tecnologías de aprovechamiento energético del biogás

Según el manual del biogás [54], el biogás podría ser un sustituto del gas natural para ser utilizado en diferentes aplicaciones, entre estas, la producción de calor o vapor en aquellas locaciones donde los combustibles son escasos, ya que los quemadores de gas convencionales son fácilmente adaptables para operar con biogás, simplemente cambiando la relación de aire-combustible y así proporcionando la energía calórica para actividades básicas como cocinar y calentar agua. Según Masebinu S. y Muzenda E. [65] el biogás podría ser utilizado como combustible vehicular en motores a gasolina y diésel si a este se le diera el tratamiento explicado con anterioridad. Otros sistemas llamados cogeneradores producen principalmente electricidad y calor. Para aplicaciones de generación de energía son usados comúnmente los motores de combustión interna, pero las microturbinas presentan ciertas ventajas con respecto a estos, con eficiencias comparables además de menos partes móviles por lo tanto menor mantenimiento. Debido a estas ventajas y su flexibilidad de operación, se consideran las microturbinas a gas como una tecnología mediante la cual podrían llevarse a cabo procesos de conversión de energía a partir del aprovechamiento del biogás como combustible.

2.10.1 Microturbina a gas con recuperación

De acuerdo con Soares C. [66], las microturbinas a gas poseen turbinas de tamaño reducido con capacidades entre 25 y 300 kW con eficiencias que oscilan de 30 a 33% [67]. Según Sanmartín E. [68] su diferencia con las turbinas convencionales parte de la simplificación de los elementos mecánicos, ya que estas poseen compresores y turbinas de varias etapas en donde sus rangos de velocidades angulares oscilan entre 15.000 y 20.000 rpm, las cuales deben ser acopladas a un reductor mecánico bajando estas velocidad a 1.500 rpm para generar la frecuencia de energía eléctrica buscada. Las microturbinas en cambio solo poseen 1 eje al cual se acoplan el compresor de 1 etapa, turbina de 1 etapa y eje alternador generando así ventajas de mantenimiento, peso y dimensiones. El sistema gira a velocidades angulares de 96.000 rpm en donde no se requiere reductor mecánico, ya que para la generación de frecuencias útiles se emplea electrónica de potencia. Primero se genera corriente alterna a frecuencia variable, luego se convierte a corriente continua y nuevamente por medio de un inversor se vuelve a convertir en corriente alterna. De este modo la microturbina es independiente de la frecuencia de la red y permanece sincronizada, este hecho hace la máquina muy sencilla y fiable.

Por esta razón son más costosas que los grupos electrógenos que constan de un motor de movimiento alternativo y un generador, ya que sus precios oscilan en costes de inversión

incluyendo instalación desde 2.500 a 4.500 USD/kW [69] dependiendo de la potencia instalada, mientras que precio de un grupo electrógeno varía entre 282 a 591 USD/kW [70].

Las microturbinas pueden clasificarse de dos maneras, por el tipo de eje, simple o doble, donde el simple es el más usado ya que este permite reducir los costes de producción y tiene un mantenimiento más simple. Estas se pueden clasificar por el tipo de ciclo, simple donde se mezcla el aire comprimido con el combustible y se hace la combustión bajo condiciones de presión constante, o con regeneración donde un sistema de recuperación de calor, el cual aprovecha los gases de escape de la turbina para elevar la temperatura en el aire comprimido mediante el uso de un intercambiador de calor, esto puede provocar que el sistema duplique su eficiencia eléctrica. A continuación, en la Figura 7, se muestra una microturbina con regeneración comercial.

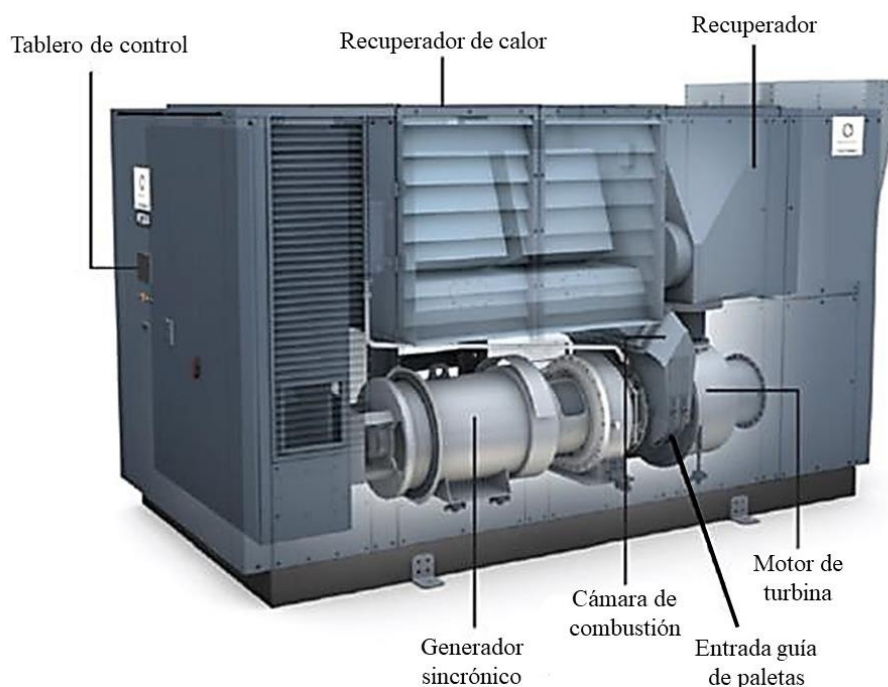


Figura 7. Microturbina FlexTurbine MT250. Adaptado de [71].

Estos sistemas pueden operar con una gran variedad de combustibles entre los que se encuentran, el gas natural y el biogás. De acuerdo con *Naturgy* [72], su amplia flexibilidad y capacidad de operación facilita su implementación en diferentes aplicaciones como: micro cogeneración y transporte híbrido.

El funcionamiento de una microturbina con regeneración es similar a una turbina convencional, en donde inicialmente el aire necesario para la combustión es comprimido y forzado a pasar por el lado frío del recuperador, donde a su vez los gases de escape de la turbina son utilizados para precalentar el aire antes de entrar a la cámara de combustión. En la cámara de combustión, el aire precalentado se mezcla con el combustible en condiciones

de presión constante. Los gases de escape se expanden en la turbina, generando energía rotacional la cual acciona por medio del compresor y el generador eléctrico. Posteriormente los gases de escape pasan al recuperador para ya finalmente salir del sistema [66].

CAPÍTULO III

En este capítulo, se presenta el marco metodológico empleado para el análisis del potencial energético del aprovechamiento de biogás generado a partir de la biodigestión anaeróbica de residuos de café en una microturbina a gas, llevada a cabo en tres fases. En la primera fase, se realizó la selección de la materia prima, esto con base en el potencial productivo del Triángulo del Café y la caracterización fisicoquímica de los residuos. En la segunda fase, se presentó un modelo que permitió estimar el potencial de generación de biogás mediante la digestión anaerobia. En la tercera fase, se presentó un modelo termodinámico para estimar el potencial de generación aprovechando biogás en un sistema de generación de potencia basado en una microturbina a gas con recuperación de calor. En la Figura 8, se muestra el esquema metodológico usado en el análisis.

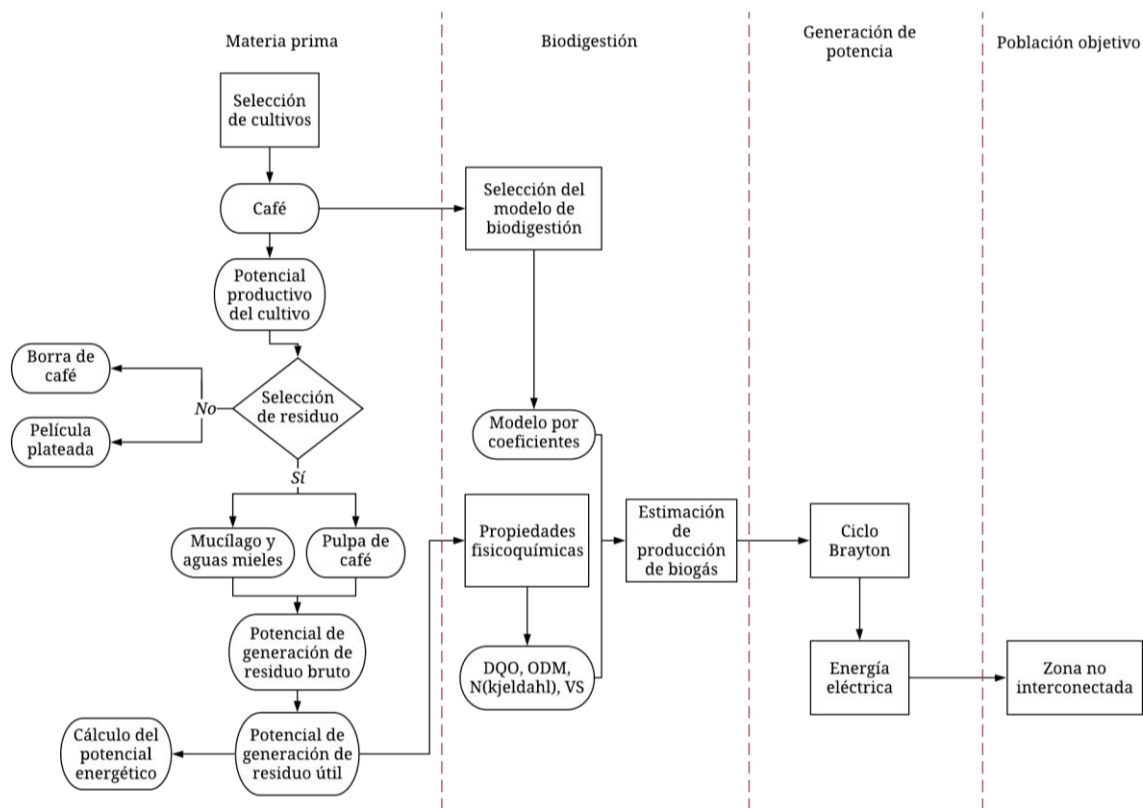


Figura 8. Diagrama de flujo del marco metodológico.

3.1 Potencial productivo

3.1.1 Selección del cultivo

Risaralda, Caldas y Quindío son departamentos con variedad de producción agrícola, entre los productos más representativos se destacan el café, el plátano, cítricos, caña panelera y aguacate, siendo el café el producto de mayor producción en los 3 departamentos [6].

3.2 Selección de residuos susceptibles a ser transformados en procesos de conversión por biodigestión anaeróbica

En el presente estudio se tuvo en cuenta para un proceso de conversión biológica de digestión anaerobia la pulpa de café por sus propiedades fisicoquímicas aptas para este, su humedad que según reportan Zambrano D. e Hinestroza J. [73] es de 78%, su relación C/N en donde Cruz R. [49] reporta que es de 13,63. Las disposiciones actuales que se le dan a esta biomasa van desde el almacenamiento en fosas hasta el vertimiento en quebradas o no hacer nada con ella. Si se compararan los usos nombrados con el de conversión biológica, se notaría un desaprovechamiento de su potencial energético para ser usado en diferentes procesos, sean de conversión energética para la obtención de energía eléctrica, cocción de alimentos o incluso para calentar los cerdos recién nacidos para que así que no mueran por frío. Además de que su composición fisicoquímica es apta también se seleccionó como primera opción porque compone la mayor parte de los residuos, como se muestra en la Figura 9, la pulpa representa el 47,2% del peso del fruto fresco, mientras que el mucilago un 18,5%. En la Figura 9, se muestran los porcentajes que representan cada uno de los residuos asociados al beneficio del café.

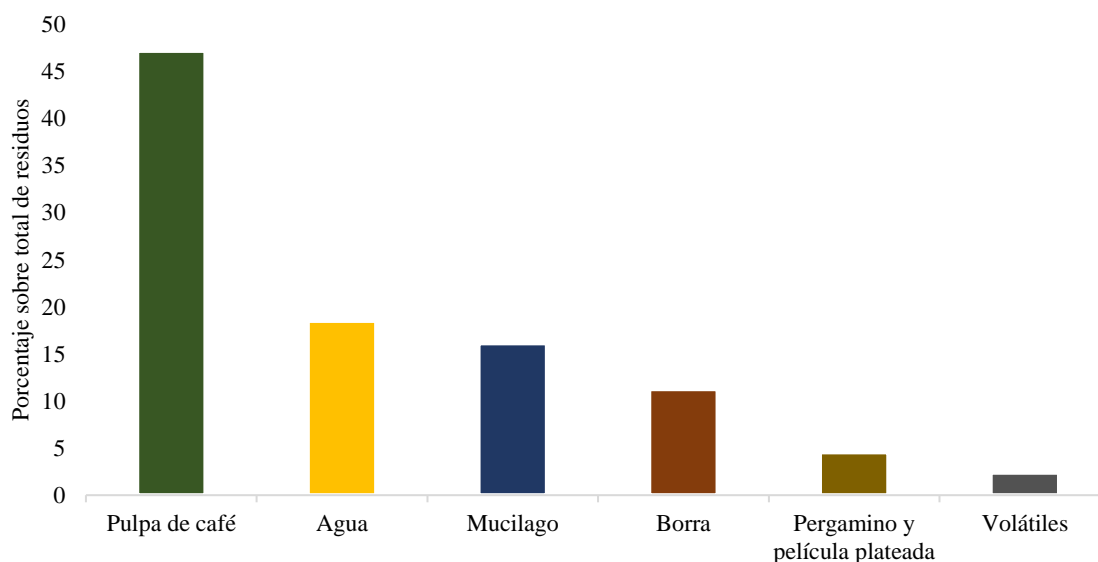


Figura 9. Porcentaje que representa cada uno de los residuos.

3.3 Potencial productivo departamental teórico y técnico de la pulpa residual de café

Para estimar el potencial de generación de residuo anual promedio por departamento entre los años 2007 y 2018 P_{RDa} [t] y con base en los datos unificados por Agronet [6] se consideró un coeficiente que representa la generación de pulpa de café Pu y la producción anual promedio de café por departamento para cada uno de los 3 departamentos, Pd_{RC} , potencial descrito mediante la ec.(1).

$$P_{RD a_k} = Pu P d_{RC k} \quad (1)$$

Con base en el trabajo realizado por Aristizábal C. y Duque H. [44], asociado a la caracterización del proceso de beneficio de café en cinco departamentos cafeteros de Colombia, se tomaron las disposiciones para el manejo de la pulpa en cuatro tratamientos diferentes. Dado que las disposiciones tienen diferentes participaciones porcentuales en cada uno de los cuatro tratamientos y que estos a su vez tienen una participación porcentual diferente en toda la muestra, se debe hacer un tratamiento estadístico para hallar datos centralizados de todas las disposiciones P_i , el cual se halla de la multiplicación de cada coeficiente de disposición P_{t_j} por el coeficiente que representa el tratamiento en la muestra P_{i_t} con lo cual se llega a la ec.(2) que nos permite encontrar el valor del coeficiente global de cada disposición.

$$P_i = \sum_t^n P_{t_j} P_{i_t} \quad (2)$$

Con los valores de los coeficientes globales y el potencial departamental de la pulpa, es posible estimar el potencial de disposición departamental $P_{DD k,i}$ [t], el cual define el manejo de la pulpa en cada departamento de acuerdo con la ec.(3).

$$P_{DD k,i} = P_i P_{RD a_k} \quad (3)$$

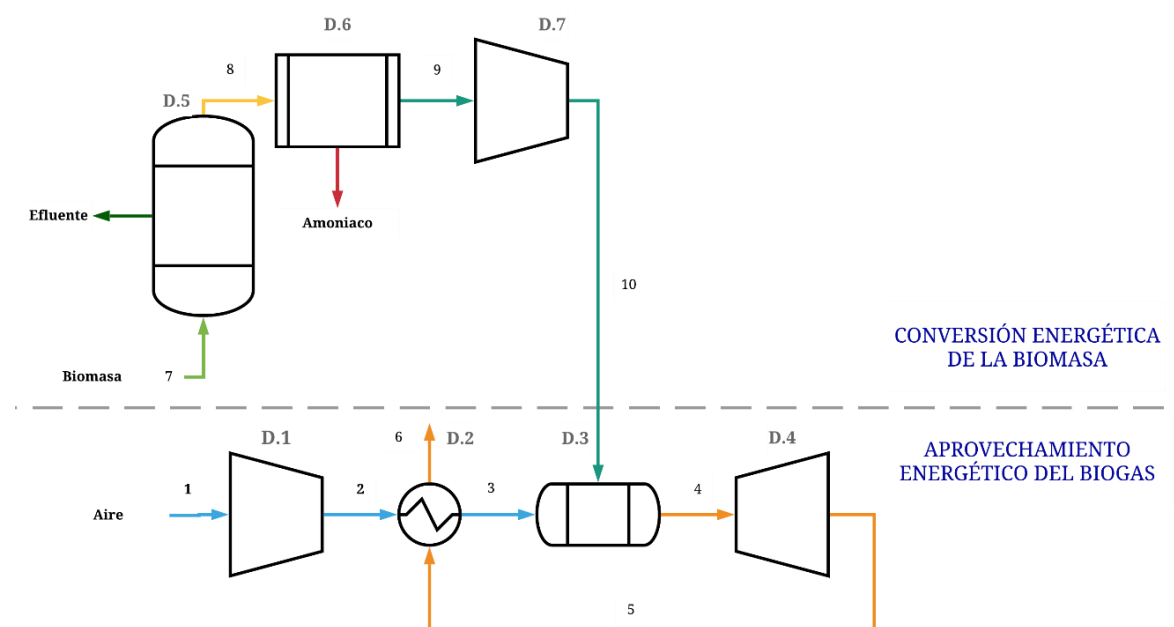
El potencial de residuo útil Pu_u , puede ser calculado a partir de la suma de los coeficientes de disposiciones disponibles de la pulpa para ser dispuestos en un proceso de biodigestión como muestra la ec.(4).

$$Pu_u = \sum_i^{i-n} P_{DD k,i} \quad (4)$$

3.4 Modelo termodinámico del sistema de generación de potencia

Se selecciono para la investigación un sistema de microturbina a gas, la cual esta acoplada a un biodigestor anaeróbico para suplir las necesidades energéticas de poblaciones vulnerables en zonas no interconectadas del país, o en pequeñas locaciones como fincas cafeteras donde se presenta potencialidad productiva. Como se muestra en la Figura 10, el sistema se compone de dos subsistemas, en el primero ocurre la conversión energética de la biomasa y está compuesto de tres dispositivos, biodigestor anaeróbico, filtro de NH_3 y un compresor de biogás, en el segundo subsistema ocurre el aprovechamiento energético del biogás y se compone de cuatro dispositivos, compresor de aire, intercambiador de calor, cámara de combustión y de la turbina. El proceso que ocurre en el sistema inicia con un flujo de biomasa que entra a el reactor anaeróbico donde se produce la fermentación metanogénica dando como resultado dos flujos, el efluente y el biogás. El flujo de biogás es dirigido a el filtro de amoniaco. El biogás filtrado es comprimido y llevado a la cámara de combustión en la cual

se realiza el proceso de transformación termoquímica del biogás. Los gases de combustión se expanden en la microturbina generando la potencia mecánica que acciona el generador. El calor residual de los gases es disipado en un intercambiador de calor con el fin de precalentar los gases provenientes del compresor. En la Figura 10, se encuentra el diagrama esquemático del sistema de generación de potencia basado en una microturbina a gas acoplado a un reactor anaeróbico.



D.1	Compresor aire	D.5	Biodigestor
D.2	Intercambiador de calor	D.6	Filtro NH_3
D.3	Cámara de combustión	D.7	Compresor biogás
D.4	Turbina		

Figura 10. Diagrama del ciclo de la microturbina a gas con regeneración.

3.5 Caracterización fisicoquímica de la biomasa residual agrícola

3.5.1 Caracterización fisicoquímica de la pulpa de café

La caracterización fisicoquímica de la pulpa se seleccionó de diversas fuentes. Los valores de COD y N_{org} según Zambrano D. e Hinestroza J. [73], el valor de ODM fue hallado según la definición de De Jong W. y Van Ommen J. [57] y en base a las mediciones de materia seca y cenizas de Aguirre L. *et al* [74] y el valor de VS según Cruz R. [49]. Los valores que se seleccionaron se presentan a continuación en la Tabla 8.

Tabla 8. Caracterización fisicoquímica de la pulpa de café.

Propiedad fisicoquímica	Fracción
COD	84,8 [g/kg]
ODM	92,1 [g/kg]
VS	0,687 [-]
N _{Org}	1,43 [g/kg]

3.5.2 Caracterización fisicoquímica del mucilago de café

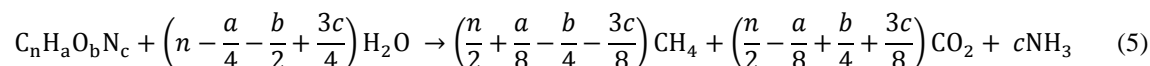
La caracterización fisicoquímica del mucilago se seleccionó de diversas fuentes. Los valores de COD, N_{org} y materia seca según Zambrano D. e Hinestroza J. [73], el valor de ODM fue hallado según la definición de De Jong W. y Van Ommen J. [57] en base a las mediciones de cenizas según Blandón C. *et al* [75] y el valor de VS según Rojas J. [76]. Los valores que se seleccionaron se presentan a continuación en la Tabla 9.

Tabla 9. Caracterización fisicoquímica del mucilago de café.

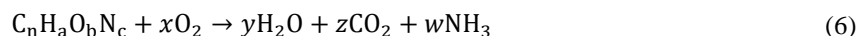
Propiedad fisicoquímica	Fracción
COD	30,3 [g/kg]
ODM	18,7 [g/kg]
VS	0,092 [-]
N _{Org}	0,431 [g/kg]

3.6 Modelo matemático de biodigestión anaerobia

Para estimar la estequiometría general de la biodigestión se partió del supuesto que la composición elemental del sustrato orgánico, pulpa de café, es de la forma $C_nH_aO_bN_c$ y la reacción de la biodigestión está dada por la ec.(5) [77], con esta y mediante balances elementales, es posible conocer los coeficientes estequiométricos de los productos finales.



La ec.(6) [78] es utilizada para estimar el valor de COD.



Por lo tanto, se emplean las ec.(7), ec.(8) y ec.(9) [57] partiendo de la suposición de una combustión completa de un kmol de carbono, $c = 1$, así obteniendo la composición elemental de un compuesto orgánico de carbono, esto se reemplaza en la ec.(1) y así se obtienen las fracciones de CH_4 y CO_2 del biogás resultante.

$$a = \frac{308COD + 704N_{Org}}{49COD - 64N_{Org} + 112ODM} \quad (7)$$

$$b = \frac{2240DM - 56COD - 304N_{Org}}{49COD - 64N_{Org} + 1120DM} \quad (8)$$

$$c = \frac{352N_{Org}}{49COD - 64N_{Org} + 1120DM} \quad (9)$$

El volumen de metano producido puede ser calculado mediante la ec.(10) como indica [77] para la predicción del BMP basada en un análisis de composición química.

$$BMP = \frac{22400 \left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} - \frac{3c}{8} \right)}{12n + a + 16b + 14c} VS \quad (10)$$

Para el cálculo de la producción de biogás por kilogramo de sustrato, se parte de que se alcanza todo el potencial bioquímico del metano y este representa un porcentaje del total del biogás así, mediante la ec.(11) se obtiene el valor total de biogás producido.

$$V_{Bio} = \frac{BMP}{\%_{CH_4}} \quad (11)$$

El potencial de producción anual de biogás se calcula partiendo del 100% del aprovechamiento del potencial de residuo útil Pu_u , tomando el promedio de producción comprendido entre los años 2007 a 2018 de los 3 departamentos, Risaralda, Caldas y Quindío, que es de 62.102.769 kg de pulpa útil. Con esto podemos estimar la producción anual con la ec.(12).

$$V_{Total} = V_{Bio} P_{ru} \quad (12)$$

Con la producción anual y un factor de conversión, se calcula el flujo de biogás con la ec.(13).

$$\dot{V}_{Total} = \frac{V_{Total}}{s_{año}} \quad (13)$$

Donde $s_{año}$, es la cantidad de segundos que hay en un año natural.

3.7 Modelo termodinámico de los componentes del sistema de generación de potencia basado en una microturbina a gas con recuperación

Considerando que los gases usados para este sistema tienen presiones bajas y su temperatura es alta, se usó el modelo de la ecuación de estado para gases ideales, ya que según lo menciona Çengel Y. y Boles M. [79] los gases pueden ser tratados de manera ideal con la ecuación de estado para gases ideales ya que se aproxima a un comportamiento P-v-T a bajas densidades. A altas temperaturas y bajas presiones la densidad del gas decae, y el gas se comporta como un gas ideal bajo estas condiciones. Otra de las consideraciones que se tuvo fue la no caída de presiones ni temperaturas en las tuberías. A continuación, se explican las ecuaciones usadas para modelar el sistema de generación de potencia y de conversión química de la biomasa.

3.7.1 Compresor

A la temperatura promedio del compresor (T_{prom}), el c_p de aire ($\bar{c}_{p,aw}(T)$), es calculado mediante la ec.(14), donde y_{air} y $c_{p,air}$ son las fracciones molares y calores específicos de los elementos que componen el aire húmedo respectivamente.

$$\bar{c}_{p,aw}(T) = \sum y_{air} c_{p,air}(T_{prom}) \quad (14)$$

Aplicando el balance de energía al volumen de control que define el compresor, la potencia consumida por el compresor puede ser calculada mediante la ec.(15) [80]:

$$\dot{W}_c = \dot{N}_c(\bar{h}_j - \bar{h}_i) \quad (15)$$

El flujo molar de aire húmedo puede ser calculado mediante la ec.(16) como sigue [80]:

$$\dot{N}_c = \dot{m}_{aw}/MW_{aw} \quad (16)$$

Considerando la eficiencia del compresor η_c y la razón de presiones $r_c = P/P_0$, la temperatura de salida del aire puede ser calculada mediante la ec.(17):

$$T_j = T_i \left[1 + \frac{1}{\eta_c} \left(r_c^{\frac{R_u}{\bar{c}_{p,a}(T^*)}} - 1 \right) \right] \quad (17)$$

donde, $T^* = (T_j + T_i)/2$ es la temperatura media entre la succión y la descarga. Para el caso de este estudio, y la relación de presión r_c óptima para el compresor, de acuerdo Wang W. *et al* [67] debe estar entre 4 y 10, donde para este caso se usó una de 4.

3.7.2 Recuperador

Considerando la eficacia del recuperador ϵ_R , el aumento en la temperatura del aire que entra a la cámara de combustión puede ser calculado mediante la ec.(18).

$$\frac{\dot{m}_{gc} C_{p_{gc}} \epsilon_R \Delta T_j}{MW_{gc}} = \frac{\dot{m}_{air} C_{p_{air}} \Delta T_i}{MW_{air}} \quad (18)$$

3.7.3 Filtro de NH_3

Considerando una eficiencia del filtro $\eta_{F_{NH_3}}$, los residuos de amoníaco en el biogás pueden ser calculados mediante la ec.(19):

$$R_{NH_3} = NH_3 (1 - \eta_{F_{NH_3}}) \quad (19)$$

3.7.4 Compresor biogás

El calor específico del biogás $\bar{c}_p(T^*)$ puede calcularse mediante la ec.(20) como sigue [80]:

$$\bar{c}_p(T^*) = \sum_n y_n \bar{c}_{p,n}(T^*) \quad (20)$$

Donde, $\bar{c}_{p,n}(T^*)$ es el calor específico de cada especie química que conforma la mezcla gaseosa, y es calculado mediante la base de datos de JANAF utilizada por software EES considerando la temperatura a la entrada y descarga de la turbina.

Considerando un cálculo iterativo, la temperatura de salida de los gases puede ser calculada mediante la ec.(21) como sigue [81]:

$$T_j = T_i \left[1 + \frac{1}{\eta_c} \left(r_c^{\frac{R_u}{\bar{c}_{p,a}(T^*)}} - 1 \right) \right] \quad (21)$$

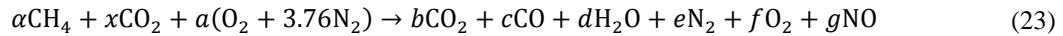
Aplicando el balance de energía al volumen de control que define el compresor, la potencia consumida por el compresor puede ser calculada mediante la ec.(22) [80]:

$$\dot{w} = \dot{N}_{biogas}(\bar{h}_j - \bar{h}_i) \quad (22)$$

Donde el flujo molar de biogás puede ser calculado mediante un balance de masas en la cámara de combustión.

3.7.5 Cámara de combustión

La reacción química que tiene lugar en la cámara de combustión está dada por la ec.(23)



El modelo considera la disociación de N_2 en la cámara de combustión, en donde la entalpía de reacción se rige por la ec.(24).

$$\Delta H = H_{\text{productos}} - H_{\text{reactivos}} = \sum (n_p H_p) - \sum (n_r H_r) \quad (24)$$

El poder calorífico inferior del biogás esta dado por la ec.(25):

$$PCI = \frac{-(H_{Pr} - H_R)}{MW_{eg}} \quad (25)$$

El flujo de biogás ideal para que la temperatura de salida no exceda los 1.200 °C, la cual es fijada, ya que a pesar de que si esta temperatura es más alta la eficiencia aumentaría, no es posible porque la resistencia a la fatiga de los alabes de la turbina que son constantemente sometidos a las altas temperaturas de los gases dictamina que estos no pueden sobrepasar una temperatura que es aproximada a 1200 °C [80]. El valor del flujo es calculado empleando el balance de energía que define la cámara de combustión como se muestra en la ec.(26):

$$\dot{N}_{gc} c_{p,gc} T_j = \dot{N}_{air} \bar{c}_{p,aw} T_i + \dot{N}_{Biogas} \bar{c}_{p,Biogas} T_i + \dot{m}_{biogas} PCI \quad (26)$$

La humedad del aire es calculada mediante la ec.(27) [79].

$$\omega_{air} = \frac{0,622P_{vapor}}{P_i - P_{vapor}} \quad (27)$$

Las emisiones de CO₂ se hallan mediante la ec.(28)

$$E_{CO_2} = y_{CO_2} MW_{CO_2} \frac{MW_{biogas}}{MW_{eg}} \quad (28)$$

3.7.6 Turbina

Aplicando el balance de energía al volumen de control que define la turbina, la potencia eléctrica generada por la turbina puede ser calculada mediante la ec.(29) como sigue:

$$\dot{w} = \dot{N}_{gc}(\bar{h}_i - \bar{h}_j) \quad (29)$$

El flujo molar de los gases de combustión puede ser calculado mediante un balance de masas en la cámara de combustión, como se muestra en ec.(30):

$$\dot{N}_{gc} = \dot{N}_{biogas} + \dot{N}_c \quad (30)$$

Considerando un cálculo iterativo, la temperatura de salida de los gases puede ser calculada mediante la ec.(31) como sigue:

$$T_j = T_i \left\{ 1 - \eta_T \left[1 - \left(\frac{1}{r_c} \right)^{\frac{R_u}{\bar{c}_p(T^*)}} \right] \right\} \quad (31)$$

Donde, el calor específico de la mezcla gaseosa $\bar{c}_p(T^*)$ puede calcularse mediante la ec.(32) como sigue [80]:

$$\bar{c}_p(T^*) = \sum_n y_n \bar{c}_{p,n}(T^*) \quad (32)$$

Donde, $\bar{c}_{p,n}(T^*)$ es el calor específico de cada especie química que conforma la mezcla gaseosa, y es calculado mediante la base de datos de JANAF utilizada por software EES considerando la temperatura a la entrada y descarga de la turbina.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1 Potencial de residuo útil

Basados en un sistema de generación de potencia basado en una microturbina a gas con recuperación de calor acoplado a un biodigestor usando como biomasa la pulpa y el mucilago de café, se realizó un análisis en el software de simulación EES (*Engineering Equation Solver*) con el fin de estimar el potencial energético que tienen estas biomásas al ser usadas como materia prima en el sistema de digestión anaerobia. Para ello se tuvo en cuenta, la producción anual de pulpa útil y algunas características fisicoquímicas de esta. Como se explicó anteriormente, la producción anual se estimó considerando que el mucilago representa el 18,5% del peso del café [7] y que de este, puede aprovecharse el 100%. Para la pulpa se identificó que esta representa el 47,2% del peso del fruto [7], y que de este, puede aprovecharse el 97,39%. Basados en un tratamiento estadístico usando las (1), (2), (3) y (4) pudo estimarse el potencial de residuo útil tanto de pulpa como mucilago para cada uno de los 3 departamentos considerados, Risaralda, Quindío y Caldas; esto con el fin de cuantificar la cantidad de residuo útil que se genera. A continuación, en la Tabla 10 se presentan los valores de producción de, mucilago, pulpa y el potencial de residuo útil promedio entre los años 2007 a 2018.

Tabla 10. Producción de café promedio entre 2007 al 2018 en el Triángulo del Café [6].

Departamento	Producción [t]	Mucilago [t]	Pulpa [t]	Pu_u [t]
Caldas	73.582	13.612	34.731	33.824
Quindío	21.594	3.994	10.192	9.926
Risaralda	51.146	9.462	24.141	23.511
Triángulo del Café	146.322	27.069	69.064	67.261

En la Tabla 10, se observa que Caldas es el mayor productor de café del Triángulo de Café, en donde Risaralda produce un 69,5% comparada con este y Quindío un 29,3%, a pesar de que Risaralda presenta la mayor producción de producción por cada hectárea de cultivo. Los tres departamentos suman una producción total de 146.322 t/año, 27.069 t/año de mucilago, 69.064 t/año de pulpa y 67.261 t/año de potencial de pulpa útil. Los valores obtenidos se representan en la Figura 11, presentada a continuación.

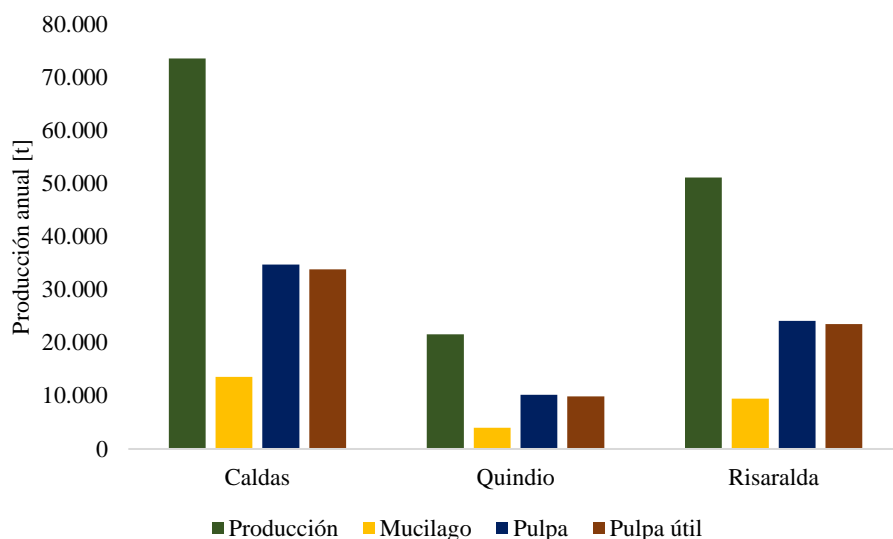


Figura 11. Promedio de producción de café entre los años 2007 a 2018 [6].

Según el tratamiento estadístico para la pulpa y de acuerdo con Aristizábal C. y Duque H. [44], se obtuvo la cantidad de pulpa de café para las disposiciones en fosa, pila, lote, lombricultivo, ningún uso y vertida a la quebrada, cuyos valores son presentados en la Tabla 11.

Tabla 11. Uso de los residuos en el Triángulo del Café.

Disposición	Caldas [t]	Risaralda [t]	Quindío [t]
Fosa	25.204	17.519	7.396
Pila	5.633	3.916	1.653
Lote	2.556	1.777	750
Lombricultivo	945	657	277
Ninguna	316	220	93
Quebrada	115	80	34

En la Tabla 11 se observa como la mayor disposición para la pulpa se presenta en fosa, ya que para los tres departamentos esta representa el 72,5%, seguido por la pila que representa un 16,2% y luego por lote con una participación del 7,4%. Así mismo, se identifica, que Caldas representa el 50,3% de desperdicios en el Triángulo del Café, seguido con Risaralda con un 35% y por último Quindío con un 14,8%. A continuación, en la Figura 12, se presentan los datos en donde se observa una diferencia marcada en la disposición de los residuos en fosa.

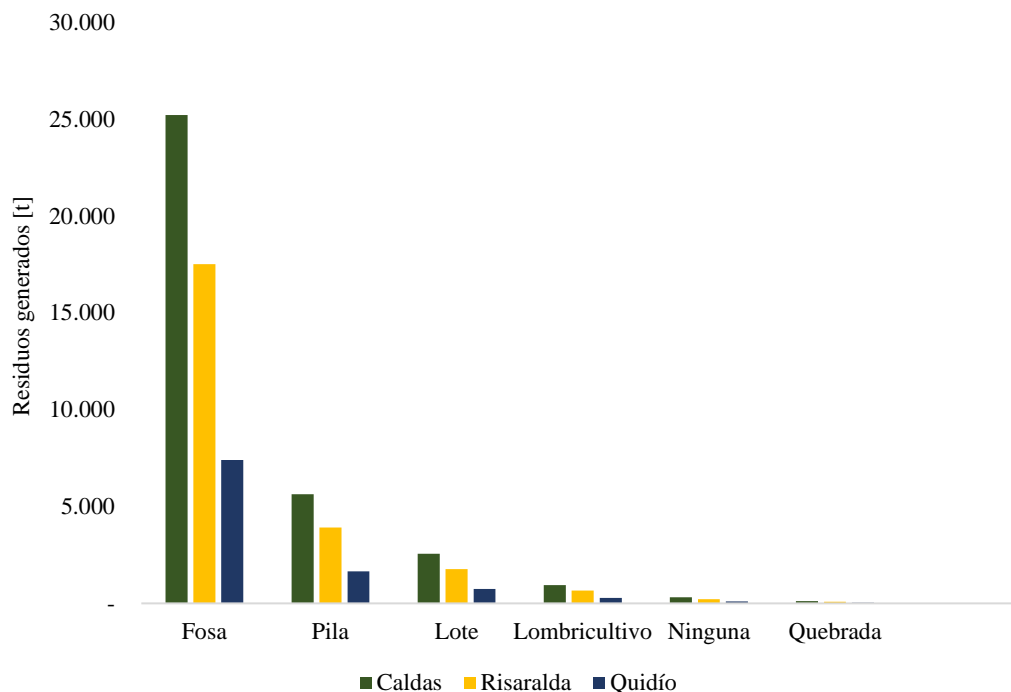


Figura 12. Usos de los residuos generados por el beneficiado de café en el Triángulo del Café.

Una de las razones para el alto uso de fosa en la disposición se debe a que es con la que más fácilmente puede darse un posterior aprovechamiento como biomasa. Además, se observa una cantidad considerable vertida a las quebradas, la cual representa un 0,33% de todas las disposiciones, siendo esto un problema ambiental mencionado con anterioridad y que está regulado por las autoridades ambientales. Conociendo cuales son los valores del potencial de residuo útil junto con la caracterización fisicoquímica del residuo, se establecen los valores de entrada del modelo de biodigestión.

4.2 Potencial de generación de biogás

Basados en el modelo matemático de biodigestión, se realizó una simulación en el software EES (*Engineering Equation Solver*) con la finalidad de estimar la generación de biogás a partir de la pulpa de café y el mucilago. El análisis considero como parámetros de entrada las características fisicoquímicas de la pulpa de café y mucilago presentados en la Tabla 8 y en la Tabla 9 respectivamente. Los resultados de generación de biogás para 1 kg de biomasa se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Generación específica de biogás.

Biomasa	Biogás [L/kg]	CH ₄ [L/kg]	CH ₄ [%]
Pulpa	487,2	221,3	45,4
Mucilago	79,1	52	65,6

Con base en lo investigado por Cruz R. [49] quienes reportan una producción de biogás de 322,5 L/kg y de metano de 217,2 L/kg, se establece un comparativo con los resultados obtenidos en el presente estudio, mediante el cual, se identifican diferencias del 51% y del 1,9% en la producción de biogás y metano, respectivamente. Estas diferencias pueden deberse al modelo de biodigestión implementado. Se tomó como base este estudio considerando que, en este, eliminan los efectos del inóculo. Así mismo, de este estudio se extrajeron dos de las propiedades fisicoquímicas de la pulpa necesarias para modelar el proceso de biodigestión. Para el caso del mucílago, según Zambrano D. [82] reporta producciones de biogás de 55,9 L/kg y Zambrano Franco D. [83] reporta porcentajes de metano en biogás del 62%. Si se compararan estos valores con los obtenidos en el presente estudio, se identifican diferencias porcentuales de 41,5% y 5,8% para la producción de biogás y metano, respectivamente. Las diferencias que se encuentran con los resultados de la literatura con los resultados obtenidos en este estudio pueden deberse a las diferencias en la caracterización fisicoquímica de los residuos, ya que las variables medidas pueden ser diferentes. En la [82] reporta producciones de biogás de 55,9 L/kg y Zambrano Franco D. [83] reporta porcentajes de metano en biogás del 62%. Si se compararan estos valores con los obtenidos en el presente estudio, se identifican diferencias porcentuales de 41,5% y 5,8% para la producción de biogás y metano, respectivamente. Las diferencias que se encuentran con los resultados de la literatura con los resultados obtenidos en este estudio pueden deberse a las diferencias en la caracterización fisicoquímica de los residuos, ya que las variables medidas pueden ser diferentes. En la Tabla 13, se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los departamentos de la generación de biogás obtenidos para pulpa útil y mucilago, además de la producción de biogás anual para la pulpa, producción de biogás anual para el mucilago, el flujo de biogás para la pulpa y el flujo de biogás para el mucilago.

Tabla 13. Potencial de generación de biogás en los departamentos que conforman el Triángulo del Café.

Potencial de generación	Triángulo del Café	Caldas	Risaralda	Quindío
Pulpa útil [t]	62.103	31.230	21.708	9.165
Mucilago [t]	27.070	13.613	9.462	3.995
Biogás anual pulpa [$\times 10^3$ m ³]	30.260	15.220	10.580	4.466
Biogás anual mucilago [$\times 10^3$ m ³]	2.147	1.080	750	317
Flujo biogás pulpa [m ³ /s]	0,960	0,483	0,335	0,142
Flujo biogás mucilago [m ³ /s]	0,068	0,034	0,024	0,010

En la Figura 13, se identifica que, en el departamento de Caldas aporta aproximadamente el 50% de la producción de biogás en el Triángulo del Café, tanto el generado por pulpa como con mucilago. Por otro lado, se observa la diferencia en la producción de biogás a partir de pulpa y mucilago, donde este último tiene un potencial de producción de aproximadamente el 7,1% del potencial de producción con la pulpa.

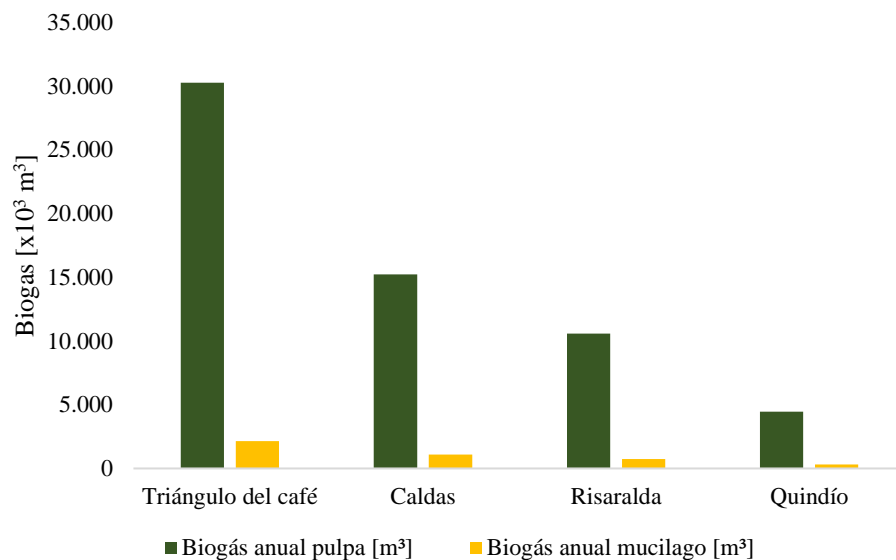


Figura 13. Producción de biogás en los diferentes departamentos del Triángulo del Café.

En lo referente a la composición química de este biogás obtenido, se identifica que esta depende de la composición fisicoquímica del sustrato. En la Figura 14 y la Figura 15, se muestran los porcentajes esperados para cada una de las especies presentes en el biogás generado a partir de la pulpa de café y mucilago, respectivamente.

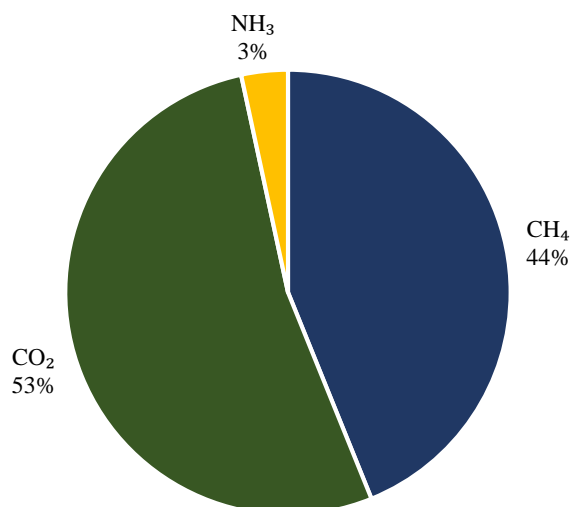


Figura 14. Porcentaje de las especies en el biogás producido a partir de la pulpa.

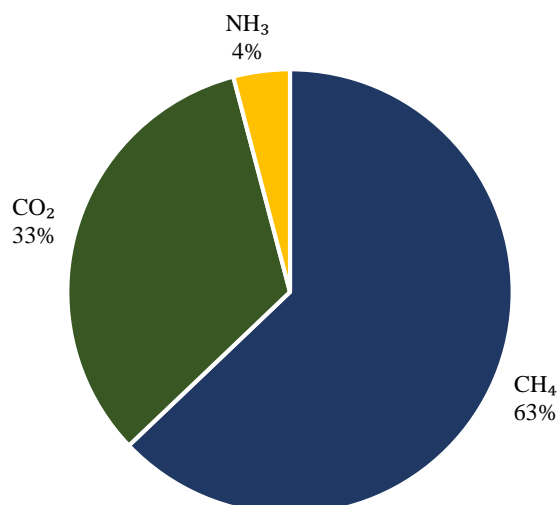


Figura 15. Porcentaje de las especies en el biogás producido a partir del mucilago.

Comparando las Figura 14 y Figura 15, se observa como el porcentaje de metano es mayor en el biogás producido por mucilago comparado al producido por la pulpa. Esto se debe a su composición química, ya que el mucilago posee una baja cantidad de ODM, factor que potencia la generación de CH₄. Debido a esto, como vemos en la Tabla 14, el poder calorífico inferior (PCI) del biogás generado por el mucilago es un 30% superior al PCI del biogás producido por la pulpa. Fue estimado un valor de 11.582 kJ/kg y 20.340 kJ/kg para el biogás generado por pulpa y mucilago, respectivamente.

Tabla 14. Poder calorífico de los biogases generados.

Poder calorífico	Pulpa	Mucilago
% CH ₄	44	63
%CO ₂	53	33
%NH ₃	3	4
[MJ/kg]	11,58	20,34
[MJ/m ³]	14,90	21,50

Según Korres N. *et al* [63] el poder calorífico esperado para el biogás oscila entre 20 MJ/m³ a 26 MJ/m³. Conociendo que los valores obtenidos para pulpa y mucilago en unidades volumétricas son de 14,90 MJ/m³ y de 21,50 MJ/m³ respectivamente para condiciones estándar, los valores son acordes para el mucilago pero para la pulpa no, esto es debido a su bajo porcentaje de CH₄ en la mezcla de biogás obtenido, pero a pesar de que el mucilago posee un valor de PCI mayor su producción de biogás no es tan alta como la de la pulpa, esto es debido a que su valor de VS es más bajo comparado con el de la pulpa, siendo estos 0,687 y 0,092 de la pulpa y el mucilago respectivamente, en donde el valor de VS del mucilago un 13,4% comparado al valor de la pulpa, repercutiendo directamente en la generación de biogás y por lo tanto, como se va a mostrar a continuación, en su potencial energético.

4.3 Potencial energético

Para el proceso de biodigestión anaeróbica, se asumió una temperatura de 323,15 K, temperatura a la cual los microorganismos mesofílicos y termofílicos trabajan en la zona metanogénica [57]; y una presión de operación del biodigestor de 121,325 kPa. A continuación, en la Tabla 15, se presentan los parámetros de operación del modelo para las biomazas residual agrícola seleccionada.

Tabla 15. Parámetros de operación.

Parámetro	Pulpa	Mucilago
Flujo másico [t/año]	67.261	27.070
Flujo másico [kg/h]	7.678	3.090
Flujo volumétrico [m³/s]	1,004	0,065

Fue considerado un proceso de filtrado del del amoniaco asumiendo una efectividad del 100% considerando que un modelamiento termodinámico de este proceso está fuera del alcance del presente estudio. De acuerdo con Persson M. *et al* [84], debe limitarse el ingreso de este gas a la cámara de combustión para así evitar la formación N₂O el cual tiene un índice GWP de 265 según la valoración del 5to reporte (AR5) [60]. Para el flujo de aire se asumió que ingresa al sistema a una presión de 101,325 kPa y una temperatura de 298,15 K. De acuerdo con lo especificado por Serrano J. y Carranza Y. [85], se toma un 15% de exceso de aire para quemadores de gas. En la Figura 16, se presentan los resultados de la generación anual de potencia para el Triángulo del Café considerando biogás como fuente de energía.

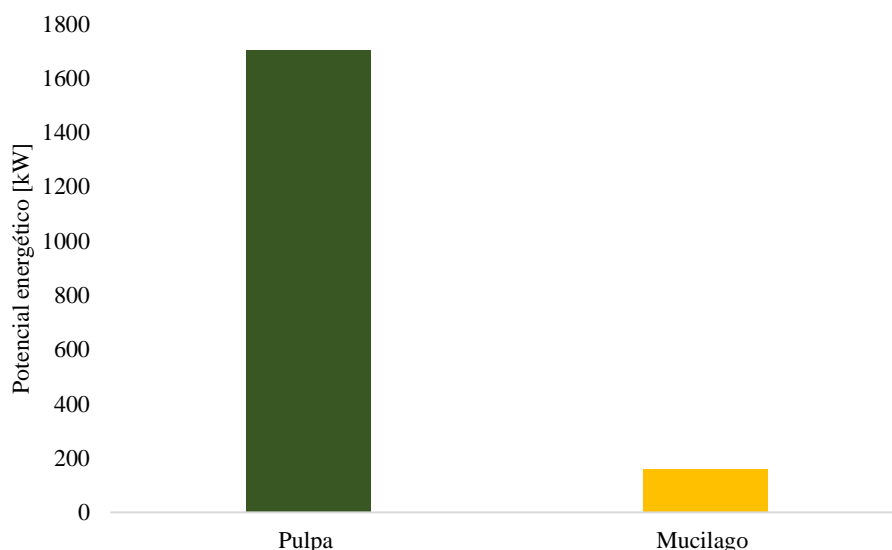


Figura 16. Potencial energético de la pulpa y el mucilago en el Triángulo del Café.

A continuación, en la Figura 17, se presenta la eficiencia del sistema de generación de potencia operando con biogás obtenido a partir de pulpa y mucílago de café.

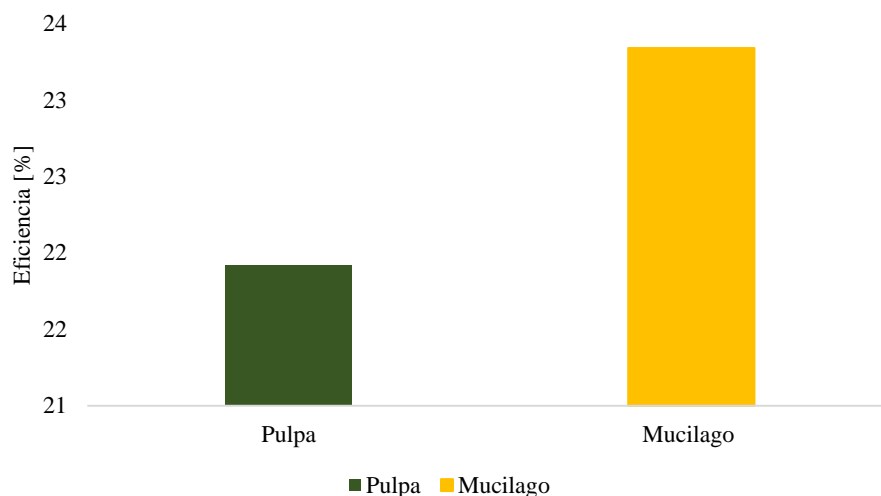


Figura 17. Eficiencia de los sistemas.

Para la microturbina a gas con recuperación de calor operando con biogás obtenido a partir de pulpa y el mucilago fue estimado un potencial de generación de 1.704 kW y 160 kW si toda la biomasa de los tres departamentos pudiese ser procesada; y eficiencias de 21,92 y 23,34%, respectivamente, comparación que se muestra en la Figura 16 y Figura 17. Según Wang W. *et al* [67], la eficiencia esperada para una microturbina con recuperación de calor es del orden del 30% al 33%. Una de las razones por las cuales con el sistema propuesto se obtienen eficiencias inferiores, es por el bajo contenido de CH_4 en el biogás, lo cual afecta el PCI de la mezcla combustible y por consiguiente la capacidad de generación de potencia. Además, se observó como con el aprovechamiento de la pulpa se obtiene un mayor potencial, aproximadamente 10 veces más potencial energético que el que podría ser generado con mucilago. Estos resultados son esperados, considerando lo presentado en la Figura 13, donde se muestra como el potencial de producción de biogás a partir de pulpa es mayor al de mucilago. Debido al gran potencial de la pulpa y las limitaciones de potencia que tienen las microturbinas, se plantea el uso de 9 sistemas de generación en el Triángulo del Café, esto con el objetivo de suplir necesidades energéticas de localidades aisladas.

Tabla 16. Parámetros de operación para las 9 microturbinas propuestas.

Parámetros	Variables
Flujo másico [t/año]	7.473
Flujo másico [kg/h]	853,14
Flujo de biogás [m^3/s]	0,11
Potencia [kW]	189,33

De acuerdo con lo presentado en la Tabla 16, cada uno de estos nueve sistemas de generación alimentado con pulpa, generaría aproximadamente un 17,5% más potencia que un solo sistema de generación que utilice todo el mucilago útil generado en el Triángulo del Café. Con el fin de corroborar lo anterior, se propuso un modelo paramétrico con el cual evaluar la potencia generada cuando el sistema es alimentado con 100 kg/h hasta 500 kg/h de biomasa. A continuación, en la Figura 18, se presentan los resultados de dicho análisis

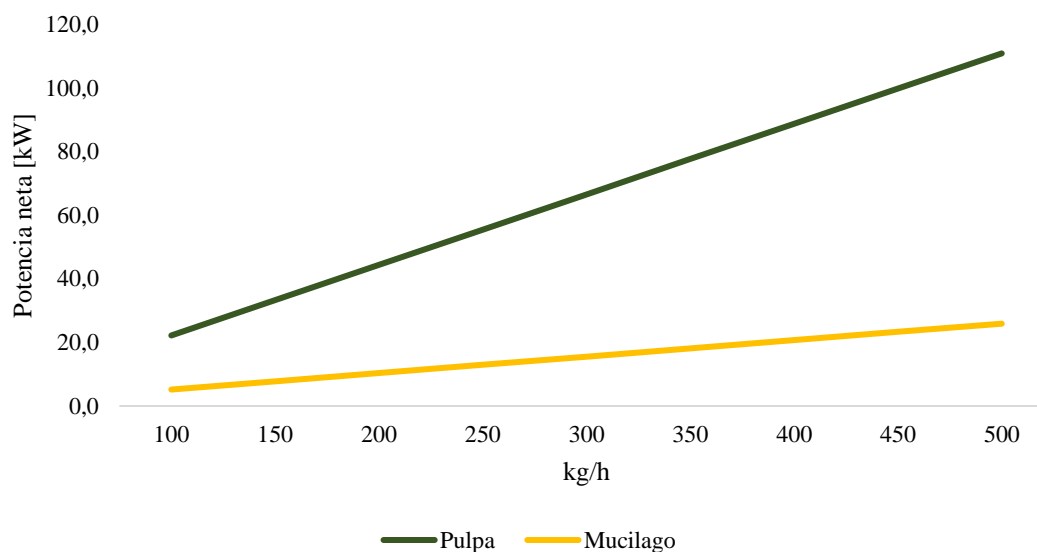


Figura 18. Potencia del sistema en función del flujo de biomasa residual procesada.

Como se identifica en la Figura 18, a pesar de que ambas líneas rectas son crecientes, la línea recta que define la operación con pulpa posee una pendiente mayor a la línea recta que describe la operación con mucilago. De lo anterior, se infiere que, la pulpa es un residuo con el cual se puede llevar a cabo un mejor aprovechamiento energético en este tipo de sistema de generación, lo cual se refiere a que con la misma cantidad de biomasa la generación de potencia de la pulpa va a ser mayor comparada a la del mucilago. En la Tabla 17 se presentan las diferentes potencias consumidas y generadas por los dispositivos del sistema de generación cuando este opera con un flujo de alimentación 100 kg/h de biomasa, esto con el fin de comparar el contenido energético ambas fuentes.

Tabla 17. Potencia en los diferentes componentes del sistema de generación.

Dispositivo	Pulpa	Mucilago
Potencia neta [kW]	22,19	5,18
Potencia Turbina [kW]	40,59	9,29
Potencia compresor de aire [kW]	15,68	3,67
Potencia compresor de biogás [kW]	2,72	0,44
Flujo energético que sale del sistema [kW]	86,24	19,34

De la Tabla 17 se observa que la potencia neta generada por la pulpa es 24,7% mayor a la generada por el mucílago, la potencia de la turbina generada por el mucilago representa el 22.8% comparado a la potencia generada por la pulpa. A continuación, en la Figura 19, se presenta la potencia generada o consumida por los diferentes dispositivos del sistema.

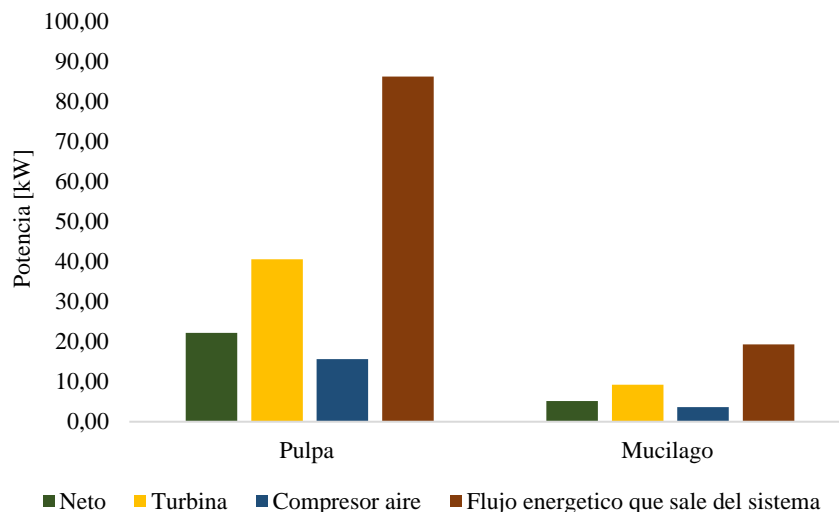


Figura 19. Potencia en los diferentes componentes del sistema de generación.

Como se observa en la Figura 19, bajo condiciones de operación similares y como era de esperarse, se identifica la diferencia entre la potencia neta generada con pulpa y mucilago. Se identifica que un 48,1% y 45,3% de la potencia generada en la turbina se consume para accionar el compresor cuando el sistema opera con pulpa y el mucilago, respectivamente. Así mismo, es bastante notable como el flujo energético que abandona el sistema en forma de energía térmica en los gases de escape posee un gran contenido energético, el cual, podría ser utilizado para calor de proceso o en una caldera de recuperación. Con los mismos parámetros de operación propuestos anteriormente, se propuso un modelo paramétrico en el análisis del comportamiento del sistema ante variaciones de la humedad del aire.

Tabla 18. Potencia y eficiencia del sistema en función de la humedad.

Humedad [%]	Potencia neta [kW]		Eficiencia [%]	
	Pulpa	Mucilago	Pulpa	Mucilago
10	21,40	5,04	21,48	23,00
20	21,48	5,06	21,49	23,01
30	21,56	5,07	21,50	23,03
40	21,64	5,09	21,51	23,04
50	21,71	5,10	21,52	23,06
60	21,79	5,12	21,54	23,07
70	21,87	5,13	21,55	23,09
80	21,95	5,15	21,56	23,10
90	22,03	5,17	21,57	23,11
100	22,11	5,18	21,58	23,13

Como se observa en la Figura 19, bajo condiciones de operación similares y como era de esperarse, se identifica la diferencia entre la potencia neta generada con pulpa y mucilago. Se identifica que un 48,1% y 45,3% de la potencia generada en la turbina se consume para accionar el compresor cuando el sistema opera con pulpa y el mucilago, respectivamente. Así mismo, es bastante notable como el flujo energético que abandona el sistema en forma de energía térmica en los gases de escape posee un gran contenido energético, el cual, podría ser utilizado para calor de proceso o en una caldera de recuperación. Con los mismos parámetros de operación propuestos anteriormente, se propuso un modelo paramétrico en el análisis del comportamiento del sistema ante variaciones de la humedad del aire.

En la Tabla 18, se presentan los valores de potencia y eficiencia en función de la humedad. Se identifica que la potencia varía hasta un 3,3% y 2,7 % para la pulpa y el mucilago, respectivamente; mientras que las variaciones en la eficiencia son del 0,46% y 0,56 % para pulpa y mucilago, respectivamente. Por lo tanto, se infiere que, las variaciones de la humedad no tienen una influencia significativa la generación de potencia del sistema.

Tabla 19. Potencia y eficiencia del sistema en función del aire de exceso.

AE	Potencia [kW]		Eficiencia [%]	
	Pulpa	Mucilago	Pulpa	Mucilago
0,80	17,14	3,96	21,43	23,11
0,91	18,13	4,25	21,13	22,72
1,02	19,61	4,62	21,20	22,74
1,13	21,85	5,10	21,82	23,26
1,24	24,13	5,61	22,42	23,79
1,36	26,43	6,11	22,95	24,27
1,47	28,72	6,61	23,43	24,70
1,58	31,00	7,11	23,85	25,09
1,69	33,29	7,61	24,24	25,44
1,80	35,56	8,11	24,60	25,76

En la Tabla 19, se presentan los valores de potencia y eficiencia en función del exceso de aire, donde se puede apreciar como la potencia puede duplicar su valor con hasta 80% de exceso de aire y la eficiencia se ve aumentada hasta en un 14%. Estos resultados invitan a trabajar con excesos de aire altos, pero esto es contraproducente como lo apunta Villaflores G. *et al* [86], cuando menciona que debe ser usado el mínimo exceso de aire posible compatible con la combustión completa del combustible, ya que, de lo contrario, se tendría un mayor consumo de combustible, aumentaría la tasa de emisiones a la atmósfera y aumentaría los costos de operación.

CONCLUSIONES

- Para suplir la demanda energética en las ZNI o de locaciones como fincas se propone el uso de múltiples microturbinas cuando la fuente es pulpa de café.
- El valor de sólidos volátiles es determinante en la generación de biogás, ya que esta es directamente proporcional a estos. Esto se nota en la producción de biogás a partir del mucilago y pulpa, ya que el mucilago al tener un valor de VS inferior al de la pulpa genera un volumen de biogás aproximadamente 6 veces menor.
- Se encontró que el PCI del biogás generado es más bajo que el presentado en la literatura, esto debido a su baja concentración de metano.
- Se identificó que la pulpa es una biomasa con mejor potencial energético que el mucilago, debido a que el sistema alcanza una mayor potencia al ser alimentado con esta, y a pesar de que la eficiencia alcanzada con mucilago sea superior dado que el biogás obtenido de esta biomasa tiene mayor PCI, su potencial energético es menor porque tiene menos rendimiento de producción de biogás que la pulpa debido a su bajo valor de VS.
- La eficiencia del sistema de generación de potencia es bajo si se compara con los valores de referencia encontrados en la literatura. Lo anterior se debe a que, en la literatura, se considera un contenido de CH_4 en el biogás entre el 50% y el 70%, a diferencia del biogás considerado en la investigación con concentraciones del orden del 45%. Adicional a esto, fue considerado que el compresor del biogás es accionado a partir de la potencia eléctrica generada por la turbina y que el aire es considerado húmedo y no seco.
- La potencia solicitada por el compresor de aire es aproximadamente 5 veces mayor que la potencia solicitada por el compresor de biogás para el caso de generación de potencia con la pulpa y cerca de 7 veces mayor para el caso de generación de potencia con el mucilago, esto debido a la relación estequiométrica de la combustión, ya que el compresor de aire tiene que suplir la demanda que requiere el biogás para su combustión y que esta se dé completa.
- El uso de herramientas como el EES para simulación es idóneo para analizar este tipo de sistemas, ya que permiten el cálculo de propiedades fisicoquímicas y termodinámicas, proponer distintos esquemas de funcionamiento del proceso y probar distintas condiciones de operación.

RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Considerando que se realizó un análisis bajo varios supuestos en a las disposiciones de la pulpa, se recomienda que estos datos en lo posible correspondan a los departamentos sobre los cuales se realiza el análisis. Además, si se desea ampliar el estudio se recomienda realizar un análisis termo económico con el cual pueda ser establecida la viabilidad de implementar un proyecto de esta escala en la región cafetera, teniendo en cuenta factores adicionales como los tiempos de cosecha, las limitaciones de transporte de la biomasa, factores de pérdidas de biomasa en los diferentes procesos de beneficiado y tiempos de retención hidráulica en el biodigestor. Así mismo, se recomienda un modelo más robusto para caracterizar el pretratamiento del biogás para ser acondicionado al proceso de combustión. Esto permitiría elevar el nivel energético del biogás y por consiguiente la potencia generada y la eficiencia del sistema. Se recomienda también el acoplamiento de algún sistema de generación de potencia adicional, considerando la magnitud del flujo energético que abandona el sistema. Podría optarse por la implementación de un Ciclo Rankine Orgánico, con el cual podría elevarse la eficiencia del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Siva Reddy . V, Kaushik SC, Tyagi SK. Exergetic analysis of solar concentrator aided natural gas fired combined cycle power plant. *Renew Energy* 2012;39:114–25. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.07.031>.
- [2] OECD/IEA. Key World Energy Statistics 2016, International Energy Agency, Paris. Int Energy Agency, Paris 2016:1–77. https://doi.org/10.1787/key_energ_stat-2014-en.
- [3] Kusch-Brandt. Urban Renewable Energy on the Upswing: A Spotlight on Renewable Energy in Cities in REN21's "Renewables 2019 Global Status Report." vol. 8. 2019. <https://doi.org/10.3390/resources8030139>.
- [4] Data & Statistics - IEA n.d. <https://www.iea.org/data-and-statistics> (accessed April 12, 2020).
- [5] UPME. Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano – agosto de 2018 2018:1–14.
- [6] Agronet n.d. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1> (accessed December 11, 2019).
- [7] Rodríguez Valencia N, Zambrano Franco D. Los subproductos del café: fuente de energía renovable. *Av Técnicos Cenicafe* 2010:8. <https://doi.org/ISSN-0120-0178>.
- [8] Ambiente M, Rodr N, Dirigida V, Alam MR. Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas. *tesis doctoral* 2009.
- [9] Puig-Arnavat M, Bruno JC, Coronas A. Review and analysis of biomass gasification models. *Renew Sustain Energy Rev* 2010;14:2841–51. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.030>.
- [10] IPSE. Instituto De Planificación Y Promoción De Soluciones Energéticas Para Las Zni . Informe Rendición Social De Cuentas 2017:1–99.
- [11] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. Zonas No Interconectadas – Zni: Diagnóstico de la Prestación del Servicio de Energía Eléctrica 2018. 2018.
- [12] X.M. S.A. E.S.P. Demanda de potencia nacional 2015. <http://informesanuales.xm.com.co/2015/SitePages/operacion/3-2-Demanda-de-potencia-nacional.aspx> (accessed August 22, 2019).
- [13] UPME. Balance de Gas Natural en Colombia 2015 - 2023 2015:1–29.
- [14] Alfaro M, Rodríguez JJ. Nota Técnica Impacto ambiental del procesamiento del café en Costa Rica. *Agron Costarric* 1994;18:217–25.
- [15] Rodríguez Valencia N, Saenz Uribe JR, Oliveros Tascón CE, Ramírez Gómez CA. Beneficio del café en Colombia Prácticas y estrategias para el ahorro, uso eficiente del agua y el control de la contaminación hídrica en el proceso de beneficio húmedo del café 2015:37.
- [16] Qué es el Gas Natural n.d. <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol->

web/productos-y-servicios/productos/gas-natural/Información General/que-es-el-gas-natural/!ut/p/z0/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAflJo8ziLQIMHd09DQy9DZwt3QwcjTwsQxw9g4I8nIz0C7IdFQEONbdQ/ (accessed April 12, 2020).

- [17] Qué es el gas natural y cómo se origina | Hidrocarburos en el Perú – Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía n.d. <http://www.loshidrocarburosenelperu.org/2012/06/que-es-el-gas-natural-y-como-se-origina/> (accessed April 12, 2020).
- [18] Navarro Soto R. Obtención de biogás a partir de residuos agrícolas y de producción de biodiésel 2016.
- [19] Reynoso MA. Biodigestión anaeróbica: una alternativa para el tratamiento de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos 2017:137.
- [20] Jorge A. H. Manual para la producción de biogás n.d.
- [21] Perrigault T. Mejoramiento del comportamiento térmico de un biodigestor low-cost tipo plug-flow 2009:1–167.
- [22] Relleno sanitario Doña Juana n.d. <http://biogas.com.co/#ciclo-produccion> (accessed April 11, 2020).
- [23] CREG. Informe Gestor del Mercado de Gas 2019:20.
- [24] Bolatturk A, Coskun A, Geredelioglu C. Thermodynamic and exergoeconomic analysis of Çayirhan thermal power plant. *Energy Convers Manag* 2015;101:371–8. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.072>.
- [25] Echeverry JC. Perspectivas de gas natural en Colombia 2015.
- [26] McKendry P. Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresour Technol* 2002;83:37–46. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3).
- [27] Glosario - Energía de biomasa n.d. <http://www1.upme.gov.co/ServicioCiudadano/Lists/Glosario/DispForm.aspx?ID=45&ContentTypeId=0x01000159F8AC1D5C1041B0AC7E63C204275F> (accessed June 2, 2020).
- [28] Rincón JM, Martínez DM, Lozano DH, Montoya OQ, Duarte González CS, Guevara Patiño PO, et al. Disponibilidad de Biomasa Residual y su Potencial para la Producción de Biogás en Colombia. *Rev CIDET* 2018:16–25.
- [29] Delgado Tardáguila R. La biomasa como recurso energético. Univ Salamanca n.d.
- [30] Kleerebezem R, Van Loosdrecht MCM. Waste characterization for implementation in ADM1. *Water Sci Technol* 2006;54:167–74. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.538>.
- [31] Molina Guardado AE, Villatoro Martinez R. Propuesta De Tratamientos De Aguas Residuales En Beneficios Humedos De Cafe 2006:298.
- [32] Rabbani KR, Jindal R, Kubota H. Enviromental sanitation reviews, composting of domestic refuse 1983.
- [33] Schattauer A. Handreichung Biogasgewinnung und–nutzung (Guidelines of biogas production and use). 2004.

- [34] Gerardi MH. The microbiology of anaerobic digesters. John Wiley & Sons, Inc.; 2003.
- [35] God F, Ecorfan L. La producción y el consumo del café. n.d.
- [36] Londoño Espinosa HD. Aprovechamiento de pulpa de café para la producción de biogás en un reactor flujo pistón. Univ Pontif Boliv 2017;6:5–9.
- [37] Rica C, Salvador E. Table 1 : Crop year production by country * In thousand 60-kg bags Table 2 : Coffee year production by country In thousand 60-kg bags 2020:2019–21.
- [38] International Coffee Organization - Aspectos botánicos n.d. http://www.ico.org/es/botanical_c.asp (accessed January 16, 2020).
- [39] Mundial B. Estudio del Sector cafetero en Colombia. Fed Nac Cafe 2002:27–32.
- [40] Panorama cafetero 2019-2020 n.d. <https://www.larepublica.co/analisis/sergio-clavijo-500041/panorama-cafetero-2019-2020-2920631> (accessed January 20, 2020).
- [41] Un Café Sobresaliente | Café de Colombia n.d. http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/el_cafe_de_colombia/un_cafe_sobre_saliente/ (accessed January 14, 2020).
- [42] Trujillo E. G. Café y PIB departamental n.d. <https://www.larepublica.co/analisis/guillermo-trujillo-estrada-505837/cafe-y-pib-departamental-2900753> (accessed January 20, 2020).
- [43] Puerta G. Influencia del proceso de beneficio en la calidad del cafe. Cenicafe 1999;50:78–88.
- [44] Aristizábal C, Duque H. Caracterización del proceso de beneficio de café en cinco departamentos cafeteros de Colombia. Cenicafé 2005;56:299–318.
- [45] Puerta Quintero GI. Buenas Prácticas Agrícolas para el café. Av Tec 349, Cenicafé 2006:3.
- [46] Cultivemos Café, Beneficio | www.cenicafe.org n.d. https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/beneficio (accessed January 16, 2020).
- [47] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC]. Norma Técnica Colombiana 3314 1992.
- [48] Solá A. Tostado y molido del café n.d.
- [49] Rosa R. Producción de biogás en sustrato sólido mediante la digestión anaerobia de pulpa de cafe 2015:124.
- [50] Ramírez-Burgos LI, Durán-Domínguez de Bazúa M del C, García-Fernández JA, Montuy-Hernández R, Oaxaca-Grande M. Demanda Química de Oxígeno de muestras acuosas. vol. 1. 2008.
- [51] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución No. 0631 del 17 marzo de 2015 2015:62.
- [52] Clavijo NM, Adrián A, Jiménez R. Evaluación de diferentes métodos para la

transformación de la pulpa de café en abono orgánico en fincas cafeteras 2016:124.

- [53] Hand D, Howe K, Crittenden J, Trussell R, Tchobanoglous G. Principles of water treatment. John Wiley & Sons, Inc.; 2012.
- [54] FAO, MINENERGIA, PNUD, GEF. Manual del Biogás. Proy CHI/00/G32 2011:120. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>.
- [55] Weiland P. Biogas production: Current state and perspectives. Appl Microbiol Biotechnol 2010;85:849–60. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>.
- [56] Metcalf and Eddy, Tchobanoglous G, Burton F, Stensel D. Ingeniería de aguas residuales. McGraw-Hill; 1995.
- [57] Jong W De, Van Ommen JR. Biomass as a sustainable energy source for the future. 2015.
- [58] Deublein D, Steinhauser A. Biogas from waste and renewable resources. Wiley; 2008.
- [59] Environnement. N. Biogas composition 2009. http://www.biogas-renewable-energy.info/biogas_composition.html (accessed June 1, 2020).
- [60] Índice GWP : definición de Índice GWP y sinónimos de Índice GWP (español) n.d. <http://diccionario.sensagent.com/Índice GWP/es-es/> (accessed April 28, 2020).
- [61] Common metrics | CMNUCC n.d. <https://unfccc.int/es/node/64712> (accessed April 28, 2020).
- [62] Greenhouse Gas Protocol. Global Warming Potential Values. Greenh Gas Protoc 2015;2014:2–5.
- [63] Korres N. Bioenergy Production by Anaerobic Digestion. 2013. <https://doi.org/10.4324/9780203137697>.
- [64] López, C. & López, O. (Universidad Veracruzana M. Diseño, construcción y puesta en operación de un biodigestor anaerobio continuo para el laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Veracruzana 2009;1.
- [65] Masebinu SO, Aboyade A, Muzenda E. Enrichment of Biogas for Use as Vehicular Fuel: A Review of the Upgrading Techniques. Artic Int J Adv Eng Sci Appl Math 2014;1:88–97. <https://doi.org/10.15242/IJRCMCE.E1113552>.
- [66] Soares C. Microturbines. Elsevier Inc.; 2007. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8469-9.X5000-3>.
- [67] Wang W, Cai R, Zhang N. General characteristics of single shaft microturbine set at variable speed operation and its optimization. Appl Therm Eng 2004;24:1851–63. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.12.012>.
- [68] Emilio Sanmartín Baños. Simulación De Una Cogeneración Basada En Microturbinas De Biogas En Una E.D.a.R. Urbana 2010.
- [69] Darrow K, Tidball R, Wang J, Hampson A. Section 5 . Technology Characterization – Microturbines. Cat CHP Technol US Environ Prot Agency Comb Head Power Partnersh 2015.

- [70] Cuál es el precio medio de los grupos electrógenos - Grupoelectrogeno.net n.d. <https://grupoelectrogeno.net/precio-medio-grupos-electrogenos/> (accessed May 12, 2020).
- [71] Wasteenergy. MT250 Series Microturbine 250 kW Continuous Onsite Electrical Power with Integrated Heat Recovery Ultra-clean electricity and useful thermal energy from a rugged and efficient generating system n.d.
- [72] Microturbinas a gas: flexibilidad para sistemas de microgeneración - Naturgy - Empresas n.d. https://www.naturgy.es/empresas/blog/microturbinas_a_gas_flexibilidad_para_sistemas_de_microgeneracion (accessed May 12, 2020).
- [73] Zambrano DA, Hinestroza JD. Demanda Química De Oxígeno Y Nitrógeno Total, De Los Subproductos Del Proceso Tradicional De Beneficio Húmedo Del Café. *Cenicafé* 1998;49:279–89.
- [74] Aguirre LA, Saca V, Apolo V. Bromatological characterization of coffee (*Coffea arabica* L .) pulp for animal feeding purposes Caracterización bromatológica de la pulpa de café (*Coffea arabica* L .) con fines de uso en la alimentación animal 2018;52:1–8.
- [75] Blandón-Castaño G, Dávila-Arias MT, Rodríguez Valencia N. Caracterización microbiológica y fisicoquímica de la pulpa de café sola y con mucílago, en proceso de lombricompostaje 1999;5–23. <https://doi.org/10.1111/j.1743-7563.2010.01370.x>.
- [76] Rojas Sossa JP. Evaluación de la producción de biogas por medio de la biodigestión anaerobia semicontinua utilizando residuos del beneficiado del café como sustrato. 2015.
- [77] Lesteur M, Bellon-Maurel V, Gonzalez C, Latrille E, Roger JM, Junqua G, et al. Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: A review. *Process Biochem* 2010;45:431–40. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2009.11.018>.
- [78] Jong W De. Biomass as a sustainable energy source for the future. 2015.
- [79] Çengel YA, Boles MA. Thermodynamics: An engineering approach. n.d.
- [80] Klein S, Nellis G. Thermodynamics. First Edit. New York: 2012.
- [81] Bang-Møller C, Rokni M. Thermodynamic performance study of biomass gasification, solid oxide fuel cell and micro gas turbine hybrid systems. *Energy Convers Manag* 2010;51:2330–9. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.04.006>.
- [82] Sarasty Zambrano DJ. Alternativas de tratamiento del mucílago residual producto del beneficiadero del café. *J Chem Inf Model* 2019;53:1689–99. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- [83] Zambrano D, Rodríguez N, Orozco A, López U. Evaluación de un reactor metanogénico tipo filtro anaeróbico de flujo ascendente para tratar aguas mieles del café. *Cenicafé* 2015;66:32–45.
- [84] Persson M, Jonsson O, Wellinger A. Biogas Upgrading To Vehicle Fuel Standards and Grid. *IEA Bioenergy* 2007:1–32.

- [85] Serrano JC, Carranza YA. Analisis Teórico De La Combustión En Quemadores De Gas Natural. Sci Tech 2005;XI:139–43. <https://doi.org/10.22517/23447214.6627>.
- [86] Villaflor G, Morales G V, Velasco J. Variables Significativas del Proceso de Combustión del Gas Natural. Inf Tecnológica 2008;19:57–62. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642008000400008>.

ANEXOS

Tabla 20. Variación de características químicas, tiempo de retención y producción de biogás para diversas materias primas [63].

Materia prima	Total, sólidos [%]	Sólidos volátiles [% de ST]	Relación C/N	Rendimiento de biogás [m³/kg]	Tiempo de retención [días]
Lodos de cerdo/estiércol	3-8	70-80	3-18	0.25-0.60	20-40
Lodos de vaca/estiércol	5-12	75-85	6-24	0.20-0.30	20-30
Estiércol de aves de corral	10-30	70-80	3-10	0.35-0.68 (0.41)	> 30
Estiércol de cabra/oveja			12/19		
Contenido estomacal/intestinal	15	80		0.40—0.68	
Grasa residual				1	
Residuos de mataderos			22-37	0,7	
Suero	1-12	80-95		0.35-0.95	3-10
Suero concentrado	20-25	90		0.80-0.95	
Lodos de flotación/grasa animal				0,775	
Porquería fermentada	1-5	80-95	4-10	0.35-0.78	3-10
Vinazas de cervecías				0,6	
Residuos de aserraderos	20-80		511		
Residuos de madera	60-70	99,6	723		
Residuos de jardín	60-70	90	100-150	0.20-0.50	8-30
Desechos de frutas	15-20	75	7-35	0.20-0.50	8-20
Desperdicio de alimentos	10	80	15-32	0.40-0.60	10-20
Residuos domésticos	40-60		18		
Residuos verdes (mercados)				0,55	
Residuos orgánicos (fuente separada)				0,45	
Residuos de jardín	60-70	90		0.20-0.50	
Papel	85-95		173		
Lodos	0.5-5		6-8	0.16-0.30	
Jacinto de agua			25		
Bombillas de flores	10	80		0.80 (0.50)	
Hojas	80	90	30-80	0.10-0.30	8-20
Virutas de madera	80	95	511		
Paja	70	90	90	0.35-0.45	10-50
Paja de maíz			60		
Maíz energético	35-39	35		0.65 (0.39)	
Hierba	20-25	90	12-26	0.20-0.64	10
Ensilado de hierba	15-25	90	10-25	0.35-0.56	10
Paja/tallos	70-90	80-90	50-150	0.10-0.375	

APENDICES

9.1 Estados en el sistema alimentado por pulpa

Tabla 21. Propiedades de los estados en el sistema alimentado por pulpa.

Estado	Temperatura [K]	Presión [kPa]	Flujo másico [kg/s]
1	298,2	101,3	0,08559
2	476,5	405,3	0,08559
3	900	405,3	0,08559
4	1473	405,3	0,09433
5	1158	101,3	0,09433
6	750	101,3	0,09433
7	-	-	-
8	323,2	121,3	0,00875
9	323,2	121,3	0,00875
10	455,1	405,3	0,00875

Tabla 22. Fracciones molares del fluido de trabajo en los diferentes estados del sistema alimentado por pulpa.

Estado	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CO	H ₂ O	N ₂	O ₂	NO
1	-	-	-	-	0,016	0,777	0,207	-
2	-	-	-	-	0,016	0,777	0,207	-
3	-	-	-	-	0,016	0,777	0,207	-
4	-	0,165	-	0,001	0,163	0,648	0,022	0,002
5	-	0,165	-	0,001	0,163	0,648	0,022	0,002
6	-	0,165	-	0,001	0,163	0,648	0,022	0,002
7	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0,439	0,527	0,034	-	-	-	-	-
9	0,454	0,546	0,000	-	-	-	-	-
10	0,454	0,546	0,000	-	-	-	-	-

9.2 Estados en el sistema alimentado por mucilago

Tabla 23. Propiedades de los estados en el sistema alimentado por mucilago.

Estado	Temperatura [K]	Presión [kPa]	Flujo másico [kg/s]
1	298,2	101,3	0,01995
2	476,3	405,3	0,01995
3	900	405,3	0,01995
4	1473	405,3	0,02104
5	1152	101,3	0,02104
6	750	101,3	0,02104
7	-	-	-
8	323,2	121,3	0,00109
9	323,2	121,3	0,00109
10	437,5	405,3	0,00109

Tabla 24. Fracciones molares del fluido de trabajo en los diferentes estados del sistema alimentado por mucilago.

Estado	CH ₄	CO ₂	NH ₃	CO	H ₂ O	N ₂	O ₂	NO
1	-	-	-	-	0,023	0,771	0,205	-
2	-	-	-	-	0,023	0,771	0,205	-
3	-	-	-	-	0,023	0,771	0,205	-
4	-	0,120	-	0,001	0,172	0,682	0,023	0,002
5	-	0,120	-	0,001	0,172	0,682	0,023	0,002
6	-	0,120	-	0,001	0,172	0,682	0,023	0,002
7	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0,629	0,330	0,041	-	-	-	-	-
9	0,656	0,344	0,000	-	-	-	-	-
10	0,656	0,344	0,000	-	-	-	-	-

Tabla 25. Emisiones del sistema.

Emisiones	Pulpa	Mucilago
EF _{CO2} [kg/kmol]	7,797	4,773
EF _{CO} [kg/kmol]	0,01602	0,0244
EF _{NO} [kg/kmol]	0,05198	0,06263
NO _x [PPM]	1610	2301
CO [PPM]	531,9	960,6